



Universidade de Aveiro
Ano 2016

Departamento de Ambiente e
Ordenamento

**Inês Filipa Gomes
dos Reis**

**Avaliação do impacto do isolamento no
conforto térmico de um edifício**



**Universidade de
Aveiro**

Ano 2016

Departamento de Ambiente e
Ordenamento

**Inês Filipa Gomes dos
Reis**

Avaliação do impacto do isolamento no conforto térmico de um edifício

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor António José Barbosa Samagaio, Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

O júri

presidente

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa

professora associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António José Barbosa Samagaio

professor associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

A realização de uma dissertação nas suas diferentes etapas envolve pessoas que, direta ou indiretamente, contribuem para a finalização do trabalho. A todos os intervenientes que permitiram a finalização deste percurso académico expresso o meu agradecimento.

Em primeiro lugar, ao Professor Doutor António Samagaio, orientador desta dissertação, pela ajuda, partilha de conhecimentos, disponibilidade e sugestões que apresentou para o desenvolvimento do trabalho.

Em segundo lugar, ao arquiteto Manuel Gonçalves, ao engenheiro Carlos Silva e à senhora Virgínia Eusébio pela compreensão e disponibilização de dados acerca da habitação que serviu de caso de estudo.

Agradeço especialmente à minha família pelo apoio e motivação transmitida e pela compreensão infindável.

Por último, agradeço aos meus amigos que nunca deixaram de me apoiar.

Palavras-chave Conforto térmico; eficiência energética; isolamento térmico; tipologias construtivas

Resumo A construção em Portugal caracteriza-se pela sua generalizada falta de qualidade térmica, não proporcionando as adequadas condições quanto à qualidade do ar interior e conforto térmico.

O principal objetivo deste trabalho consistiu na avaliação da influência do sistema construtivo e do impacto da colocação de isolamento no conforto térmico de uma habitação, através da simulação de tipologias construtivas representativas dos anos 40, 70 e da atualidade. De modo a atingir o objetivo proposto recorreu-se ao programa de simulação dinâmica *EnergyPlus*, através da sua interface gráfica *DesignBuilder*, tendo por base um edifício situado na região de Pombal.

Keywords

Thermal comfort; energy efficiency; thermal insulation; building typologies

Abstract

The construction in Portugal is characterized by a general lack of thermal quality, not providing the right conditions on the indoor air quality and thermal comfort.

The main objective of this study was to evaluate the influence of the constructive system of the envelope and the impact of insulation on the thermal comfort of a dwelling, by simulating representative building typologies of the 40s, 70s and today. In order to achieve the proposed objective it was used the dynamic simulation program *EnergyPlus*, through its graphical interface *DesignBuilder*, based on a building located in Pombal.

Índice

Lista de Abreviaturas	xix
Lista de Símbolos	xx
Capítulo I – Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo.....	1
1.3 Estrutura do trabalho.....	2
Capítulo II – Enquadramento teórico	3
2.1 Caracterização do setor energético	3
2.2 Caracterização do setor dos edifícios	6
2.2.1 Enquadramento	6
2.2.2 Legislação.....	9
2.2.3 O conforto térmico	10
2.2.3.1 Equilíbrio higrotérmico	11
2.2.3.2 Quantificação do conforto térmico	13
2.2.4 Evolução histórica das soluções construtivas	16
2.2.5 Os principais elementos construtivos.....	18
2.2.6 Balanço térmico dos edifícios	23
2.2.6.1 Variáveis a considerar	24
2.2.6.2 Mecanismos de troca de calor	26
2.2.6.3 Trocas térmicas.....	29
2.2.6.4 A inércia térmica	32
2.2.6.5 As pontes térmicas.....	33
2.2.6.6 O efeito da ventilação/ infiltração de ar	34
2.2.7 Isolamento térmico.....	34
2.2.7.1 Enquadramento	34
2.2.7.2 O efeito do isolamento térmico.....	37
2.2.7.3 Isolantes mais comuns.....	37
2.2.7.4 Propriedades dos isolantes térmicos.....	39
2.2.7.5 Espessura ótima dos isolantes térmicos	40
2.2.7.6 Local de colocação do isolamento	41
Capítulo III – Metodologia	47

3.1 Programas de simulação	47
3.2 Caracterização do caso de estudo	47
3.3 Definição de cenários.....	48
3.4 Parâmetros de simulação	49
3.4.1 Localização e clima.....	49
3.4.2 Geometria do edifício	53
3.4.3 Ganhos internos.....	53
3.4.4 Tipologias construtivas e materiais empregues.....	58
Capítulo IV – Resultados e Discussão.....	65
4.1 Geometria do edifício	65
4.2 Fachadas	65
4.2.1 Orientação de fachadas	65
4.2.2 Proporção de área envidraçada por fachada.....	66
4.3 Iluminação natural	68
4.4 Análise da envolvente opaca	69
4.5 Análise da envolvente envidraçada	73
4.6 Conformidade com a legislação	98
4.7 Determinação da inércia térmica.....	79
4.8 Resultados relativos aos cenários definidos	83
4.8.1 Resultados Cenário A	83
A.1 Simulação da solução construtiva de referência	83
A.2 Simulação da solução construtiva de referência com o dobro do isolamento	88
A.3 Simulação da solução construtiva de referência com vidro de baixa emissividade.....	88
4.8.2 Resultados do Cenário B	89
B.1 Simulação da solução construtiva da década de 1940	89
B.2 Simulação da solução construtiva da década de 1970	92
4.8.3 Resultados Cenário C	95
Capítulo V – Conclusões finais e perspectivas para trabalhos futuros.....	101
5.1. Conclusões finais.....	101
5.2. Perspetivas para trabalhos futuros.....	101
Bibliografia.....	103
Anexos	i

Anexo I ii

Anexo II iii

Anexo III iv

Anexo IV v

Anexo V vii

Anexo VI viii

Anexo VII ix

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Consumo de energia elétrica por setor de atividade na União Europeia	3
Figura 2.2 - Repartição do consumo de energia final por setor, comparação entre 2005 e 2014	4
Figura 2.3 - Consumo de energia elétrica, comparação entre 2005 e 2014	4
Figura 2.4 - Repartição dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais	5
Figura 2.5 - Evolução do tipo de aquecimento disponível, por época construtiva	5
Figura 2.6 - Distribuição de habitações com sistemas de ar condicionado	6
Figura 2.7 - Distribuição dos alojamentos familiares em Portugal	7
Figura 2.8 - Número de edifícios por época construtiva em Portugal	8
Figura 2.9 - Distribuição percentual da idade da construção existente na UE	8
Figura 2.10 - Trocas térmicas entre o sujeito e a envolvente	12
Figura 2.11 - Atividade metabólica em função da atividade exercida	12
Figura 2.12 - Efeito isolante do vestuário	14
Figura 2.13 - Evolução da conceção de fachadas em Portugal	18
Figura 2.14 - Revestimento de fachadas exteriores por época construtiva	19
Figura 2.15 - Tipo de cobertura por época construtiva	20
Figura 2.16 - Zonas climáticas de Inverno e Verão para Portugal Continental	25
Figura 2.17 - Percursos do Sol ao longo do ano	26
Figura 2.18 - Mecanismos de transferência de calor	27
Figura 2.19 - Transferência de calor por condução	27
Figura 2.20 - Trocas térmicas num edifício no período de Verão e Inverno	29
Figura 2.21 - Estimativa da energia perdida para o meio exterior	30
Figura 2.22 - Efeito do isolamento térmico nas trocas de calor de um edifício	35
Figura 2.23 - Evolução da espessura de isolamento em fachadas nos países europeus	35
Figura 2.24 - Distribuição de edifícios com e sem isolamento térmico, por época construtiva	36
Figura 2.25 - Edifícios com e sem isolamento em Portugal e por NUTS II, em 2001	36
Figura 2.26 - Comparação entre os valores de λ de diversos materiais de construção	39
Figura 2.27 - Determinação da espessura ótima de isolamento	41
Figura 2.28 - Exemplo da colocação de isolamento no interior da parede	42
Figura 2.29 - Efeitos da colocação de isolamento pelo exterior	42
Figura 2.30 - Exemplo de aplicação de isolamento no pano exterior da parede	43
Figura 2.31 - Efeitos da colocação de isolamento pelo exterior	44
Figura 2.32 - Exemplo da aplicação de isolamento no meio de uma parede dupla	44
Figura 2.33 - Efeito da colocação de isolamento na caixa-de-ar	45
Figura 3.1 - Vista frontal da moradia (Fonte: Google Maps)	48
Figura 3.2 - Seleção de ficheiros climáticos	50
Figura 3.3 - Aplicação «CLIMAS-SCE»	50
Figura 3.4 - Separador <i>Activity Template</i> do <i>DesignBuilder</i>	53
Figura 3.5 - Seleção da atividade exercida consoante os espaços	54
Figura 3.6 - Tipo de lâmpada utilizada nas habitações em Portugal	56
Figura 3.7 - Separador <i>Lightning Template</i> , do <i>DesignBuilder</i>	56
Figura 3.8 - Ganhos térmicos internos definidos pelo RCCTE	57
Figura 3.9 - Aspeto do <i>HVAC Template</i> , do <i>DesignBuilder</i>	57

Figura 3.10 - Aspeto do <i>Construction Template</i> do <i>DesignBuilder</i>	58
Figura 3.11 - Criação de elementos construtivos.....	59
Figura 3.12 - Cálculo do valor de U e R	59
Figura 3.13 – Aspeto da laje de esteira.....	60
Figura 3.14 - Criação de Portas no <i>DesignBuilder</i>	63
Figura 3.15 - Separador <i>Glazing Template</i> , do <i>DesignBuilder</i>	64
Figura 4.1 - Geometria da habitação	65
Figura 4.2 - Área opaca e envidraçada.....	67
Figura 4.3 - Iluminação natural	68
Figura 4.4 – Resistências térmicas adicionais conferidas por sistemas de obstrução solar	75
Figura 4.5 - Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis pelo DL nº 40/90	77
Figura 4.6 – Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis segundo a Portaria 348-B/2013	78
Figura 4.7 – Coeficientes de transmissão térmica de referência admissíveis a partir de 31 de Dezembro de 2015 segundo a Portaria 349-B/2013.....	79
Figura 4.8 – Balanço térmico, solução de referência.....	83
Figura 4.9 - Ganhos internos, solução de referência	84
Figura 4.10 – Consumo de energia, solução de referência.....	85
Figura 4.11 – Consumo de energia por utilização.....	86
Figura 4.12 – Comparação entre o consumo estimado e o consumoreal de energia elétrica	86
Figura 4.13 – Balanço térmico, década de 1940	90
Figura 4.14 – Ganhos internos, década de 1940	91
Figura 4.15 – Balanço térmico, década de 1970.....	93
Figura 4.16 - Ganhos internos, década de 1970	94
Figura 4.17 – Balanço térmico, isolamento pelo exterior.....	96
Figura 4.18 – Balanço térmico, isolamento pelo interior.....	96
Figura 4.19 - Ganhos internos, colocação de isolamento pelo exterior	97
Figura 4.20 - Ganhos internos, colocação de isolamento pelo interior	97

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Escala PMV	13
Tabela 2.2 - Critérios para a determinação da zona climática de inverno	24
Tabela 2.3 - Critérios para a determinação da zona climática de Verão	24
Tabela 2.4 - Resistências térmicas superficiais	32
Tabela 3.1 - Definição de cenários.....	49
Tabela 3.2 - Dados climáticos	52
Tabela 3.3 - Atividade metabólica e perfis de ocupação	54
Tabela 3.4 - Densidade de ocupantes por zona.....	55
Tabela 3.5 - Comparação entre as soluções construtivas adotadas	61
Tabela 3.6 - Cenário C, parede exterior com isolamento pelo interior	62
Tabela 3.7 - Cenário C, parede exterior com isolamento pelo exterior.....	62
Tabela 3.8 - Portas interiores e exteriores.....	63
Tabela 4.1 – Incidência solar nos meses de Julho e Dezembro	66
Tabela 4.2 –Dimensões dos vãos envidraçados, por fachada.....	67
Tabela 4.3 - Características da solução construtiva representativa da solução de referência.....	69
Tabela 4.4 - Características da solução construtiva representativa da década de 1940	70
Tabela 4.5 - Características da solução construtiva representativa da década de 1970	71
Tabela 4.6 - Características da solução construtiva representativa da colocação de isolamento na solução construtiva da década de 1940.....	72
Tabela 4.7 - Características das portas	72
Tabela 4.8 – Resistências térmicas superficiais dos envidraçados	74
Tabela 4.9 – Características dos envidraçados	75
Tabela 4.10 – Coeficientes de transmissão térmica dos vãos envidraçados	76
Tabela 4.11 - Conformidade dos resultados com o DL n° 40/90	77
Tabela 4.12 – Conformidade dos resultados com a Portaria 349-B/2013 (envolvente envidraçada).....	79
Tabela 4.13– Cálculo da massa superficial útil	81
Tabela 4.14– Cálculo da inércia térmica	82
Tabela 4.15 - Índice PMV, solução de referência.....	87
Tabela 4.16 - índice PMV, solução de referência com o dobro do isolamento	88
Tabela 4.17 - índice PMV, solução de referência com vidro de baixa emissividade	89
Tabela 4.18 - índice PMV, década de 1940.....	92
Tabela 4.19 - índice PMV, década de 1970	95
Tabela 4.20- índice PMV, isolamento pelo exterior	98
Tabela 4.21- índice PMV, isolamento pelo exterior	98

Lista de Abreviaturas

Abreviatura	Denominação
ADENE	Agência para a Energia
AQS	Águas Quentes Sanitárias
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CE	Comissão Europeia
EEA	<i>European Energy Agency</i>
EPDB	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
EPS	<i>Expanded PolyStyrene</i>
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite Systems</i>
UE	União Europeia
GD	Grau-Dia
GEE	Gases de Efeito de Estufa
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NUTS	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PUR	Poliuretano
PVC	Cloreto de polivinilo
QAI	Qualidade do Ar Interior
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RQSECE	Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema Certificação Energética dos Edifícios
XPS	<i>Extruded PolyStyrene</i>

Lista de Símbolos

Símbolos	Designação	Unidade
A	Área do elemento	m^2
C	Trocas de calor por convecção e condução	W
c_e	Calor específico	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
CO_2	Dióxido de carbono	-
E	Trocas de calor por evaporação	W
f_{cl}	Fator área do vestuário	-
F_{p-i}	Fatores de forma das superfícies em relação ao utilizador	-
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
HR	Humidade Relativa	%
I_{cl}	Isolamento conferido pelo vestuário	clo
I_t	Inércia térmica	kg m^{-2}
L	Carga térmica do corpo	W m^{-2}
M	Atividade Metabólica	W m^{-2}
M_{si}	Massa superficial útil	kg m^{-2}
m	Massa do elemento	kg
p_a	Pressão parcial do vapor de água no ar	Pa
Q	Trabalho efetuado pelos músculos para realizar uma tarefa	J
Q_{cond}	Trocas de calor devido a condução	W
Q_{GI}	Trocas de calor devido a ganhos internos	W
$Q_{\text{radiação solar}}$	Trocas de calor devido a radiação solar	W
Q_{vent}	Trocas de calor devido a ventilação	W
R	Trocas de calor por radiação	W
R_t	Resistência térmica do elemento	$\text{W}^{-1} \text{m}^2 \text{K}$
R_{se}	Resistência térmica superficial externa	$\text{W}^{-1} \text{m}^2 \text{K}$
R_{si}	Resistência térmica superficial interna	$\text{W}^{-1} \text{m}^2 \text{K}$
S	Armazenamento interno	W
T_{∞}	Temperatura do fluido num local suficientemente afastado da parede para que o seu valor não seja afetado pela presença da parede	K
t_a	Temperatura do ar	K
\bar{t}_r	Temperatura média radiante	K
t_{cl}	Temperatura superficial do vestuário	K
T_e	Temperatura exterior	K
T_i	Temperatura interior	K
T_w	Temperatura da superfície sólida que contacta com o fluido	K

Símbolos	Designação	Unidade
U_i	Coeficiente de transferência de calor do elemento i	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
v_a	Velocidade do ar	m s^{-1}
x	Espessura de um material ou elemento	m
ε	Emissividade	-
λ	Condutibilidade térmica de um material	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
σ	Constante de Stefan – Boltzmann	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
ψ	Coeficiente de transmissão térmica linear	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ρ	Massa volúmica aparente seca	kg m^{-3}

Capítulo I – Introdução

1.1 Motivação

Um dos grandes desafios da atualidade diz respeito à problemática das alterações climáticas e à degradação do meio ambiente, intimamente relacionadas com o crescente consumo de energia e com as formas de obtenção da mesma. Em Janeiro de 2008, a Comissão Europeia (CE) divulgou o plano “20/20/20 by 2020” que enuncia as metas energéticas a atingir até 2020 e que incluem:

- a redução da emissão de gases de efeito de estufa (GEE) em 20%, até 2020;
- a contribuição das energias renováveis no *mix* energético em 20%, até 2020;
- e a redução de 20% do consumo de energia primária, até 2020.

Na Europa, o setor dos edifícios é responsável por cerca de 40% do consumo de energia final, sendo portanto, um setor onde o investimento na melhoria da performance energética deve ser significativo para que as metas propostas sejam atingidas. O aumento das exigências de conforto térmico, associadas a sistemas de climatização (caros e responsáveis por consumos energéticos avultados), tem conduzido a uma crescente preocupação com este setor.

Em Portugal, os edifícios são responsáveis pelo consumo de cerca de um terço da energia final e este é o segundo setor que mais contribui para a emissão de GEE. Estes dados mostram que é preponderante atuar ao nível deste setor, tornando-o mais eficiente. A projeção de edifícios que tirem partido das condições climáticas e que incorporem materiais isolantes, contribui para a minimização do consumo energético dos mesmos, melhorando a sua performance energética e garantindo o conforto térmico dos seus ocupantes.

1.2 Objetivo

O presente trabalho pretendeu avaliar o impacto da evolução construtiva das últimas décadas no consumo energético e no nível de conforto de uma habitação, nomeadamente através da colocação de isolamento térmico. Uma vez que o desempenho energético de um edifício é fortemente influenciado pela sua construção (materiais, técnicas, localização, orientação, etc.), o objetivo deste trabalho consistia em mostrar a diferenciação entre as soluções construtivas das décadas de 40, 70 e da atualidade e verificar a (in)conformidade com a legislação em vigor. Para o cumprimento do objetivo proposto recorreu-se ao programa computacional *EnergyPlus*, através da sua interface gráfica, *DesignBuilder*, na simulação de condições consideradas relevantes para a obtenção de resultados representativos dos períodos temporais em análise.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto por cinco capítulos. No Capítulo I, pretende-se introduzir e enquadrar o tema, enunciando-se os objetivos da dissertação e a organização do trabalho. No Capítulo II, apresentam-se as disposições legais que enquadram a temática e caracteriza-se o setor energético em Portugal. Neste capítulo apresentam-se também os fundamentos teóricos inerentes ao tema do conforto térmico, definindo-se conceitos relevantes para posterior análise dos resultados obtidos. No mesmo capítulo introduz-se a temática dos edifícios e apresenta-se a evolução das técnicas construtivas nas últimas décadas, referindo-se também os mecanismos de transmissão de calor responsáveis pelas trocas térmicas em edifícios. No final do respetivo capítulo enumeram-se as características do isolamento térmico, realçando-se a sua importância no desempenho térmico dos edifícios. Posteriormente, o Capítulo III apresenta a metodologia utilizada e as considerações assumidas para os diferentes cenários estudados e no Capítulo IV apresentam-se os resultados obtidos e a respetiva discussão. Por fim, o Capítulo V enuncia as conclusões gerais resultantes do estudo efetuado e uma perspetiva futura ao tema abordado.

Capítulo II – Enquadramento teórico

2.1 Caracterização do setor energético

Na maioria dos países desenvolvidos, estima-se que entre 25% e 40% do consumo energético global se deva ao setor dos edifícios [1]. Na União Europeia, este setor que engloba habitação e serviços, é responsável por grande parte da energia elétrica consumida (v. Figura 2.1).

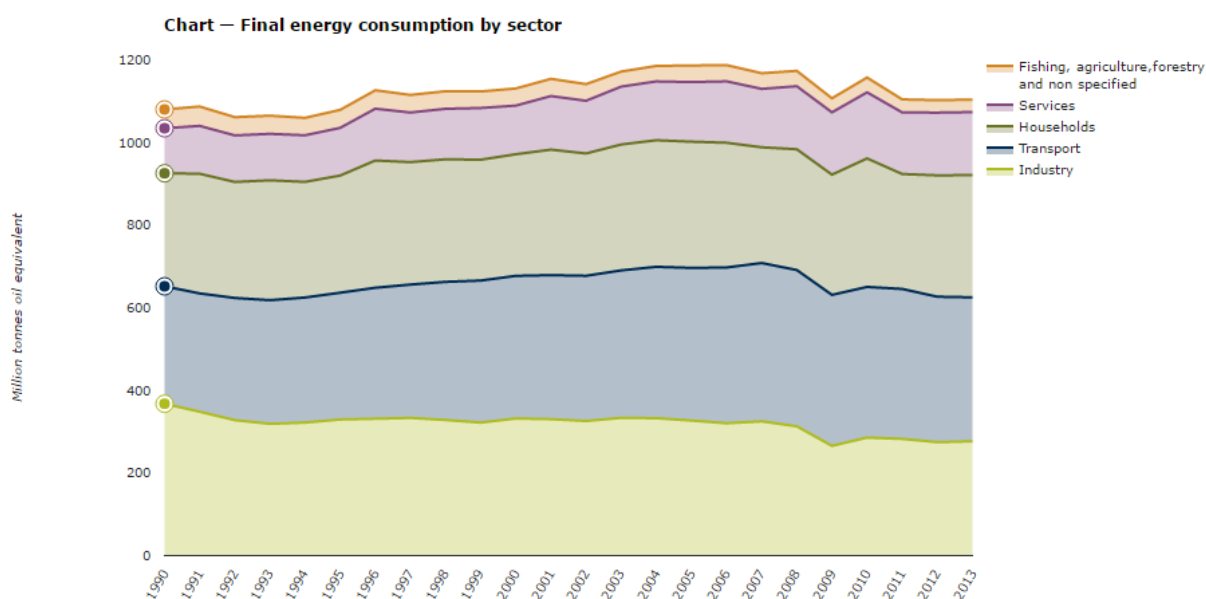


FIGURA 2.1 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA POR SETOR DE ATIVIDADE NA UNIÃO EUROPEIA [65]

Nos últimos anos, a qualidade do edificado e o conforto associado tem aumentado. As necessidades relacionadas com higiene, confeção e conservação dos alimentos, conforto térmico e o uso de equipamentos (como computadores e eletrodomésticos), são comodidades imprescindíveis. Porém, este nível de conforto traduz-se num maior consumo de energia, com o consequente aumento da emissão de GEE. Uma habitação média necessita de cerca de 3700 kWh anuais de energia elétrica, valor este que tem vindo a aumentar nas últimas décadas devido ao aumento da aquisição de equipamentos consumidores de energia. Por outro lado, o aumento do consumo energético deve-se à ineficiência dos próprios edifícios e equipamentos e à utilização dada aos mesmos, o que se prende com razões comportamentais dos utilizadores e com a dificuldade em substituir equipamentos e recuperar os edifícios. Pequenas intervenções estruturais podem ser responsáveis por uma poupança energética até 35%, sem que as condições de conforto sejam alteradas [2].

Em Portugal, no ano de 2005, o setor doméstico era responsável por cerca de 17% do consumo de energia final. Uma vez que o setor dos edifícios engloba a vertente doméstica e de serviços, o setor era responsável no respetivo ano, por 29% do consumo de energia final. No ano de 2014, o setor dos edifícios era responsável por 30% do consumo de energia final (v. Fig.2.2).

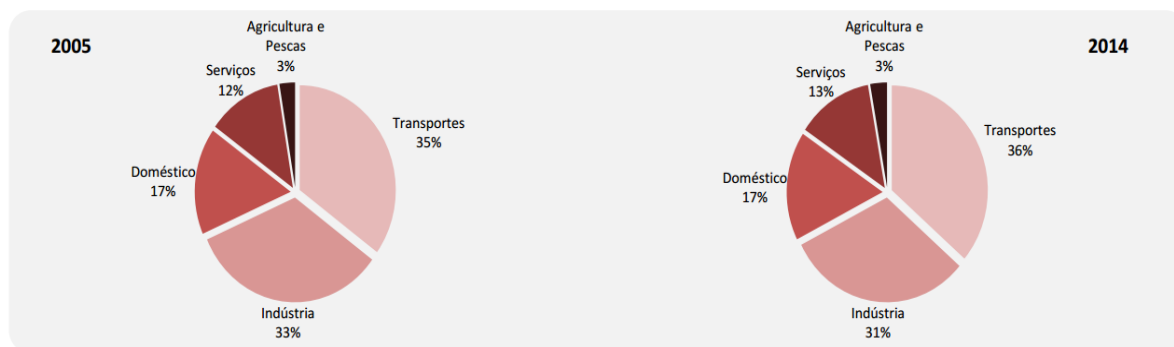


FIGURA 2.2 -REPARTIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA FINAL POR SETOR, COMPARAÇÃO ENTRE 2005 E 2014 [3]

A análise ao consumo de energia elétrica por setor em Portugal revela que, em 2005, o setor doméstico era responsável por 28% do consumo de eletricidade total. Em 2014 este valor foi reduzido em dois pontos percentuais, sendo que no mesmo ano o setor dos edifícios no seu todo era já responsável por 60% do consumo elétrico no país (v. Fig.2.3).

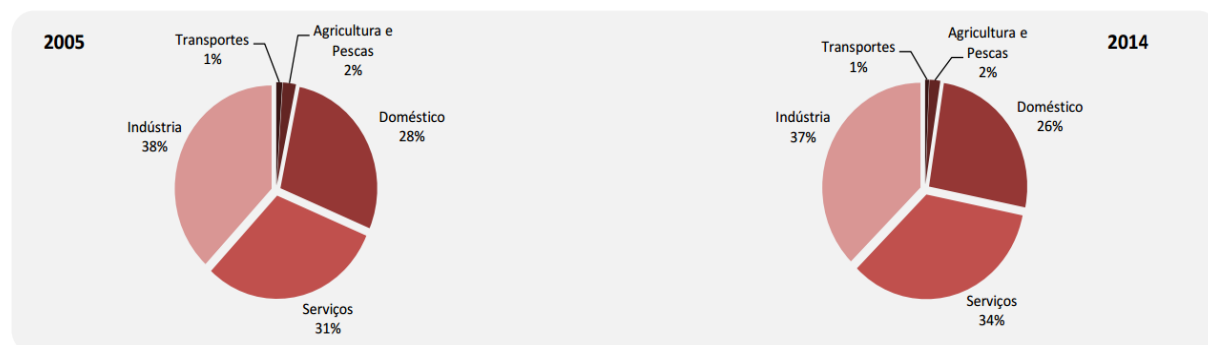
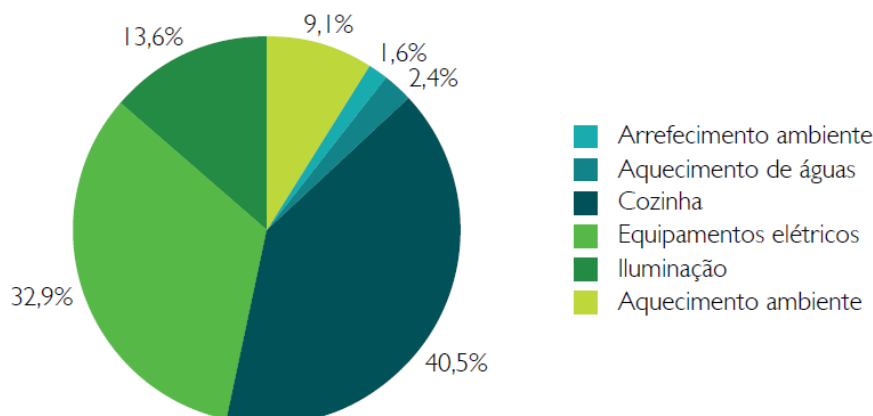


FIGURA 2.3 – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA, COMPARAÇÃO ENTRE 2005 E 2014 [3]

Quanto ao consumo de energia elétrica por utilização final, verifica-se que em 2010, nas habitações portuguesas, os equipamentos elétricos e os equipamentos presentes nas cozinhas eram os principais responsáveis pelo consumo elétrico (v. Fig. 2.4). Contudo não é fácil reduzir o consumo destes equipamentos, uma vez que apenas o aumento da eficiência dos mesmos e a consciencialização dos consumidores podem contribuir para esta redução. Por outro lado, verifica-se que o arrefecimento e aquecimento ambiente, associados diretamente ao conforto térmico são responsáveis por 10,7% do consumo de energia elétrica numa habitação. Ao nível dos sistemas

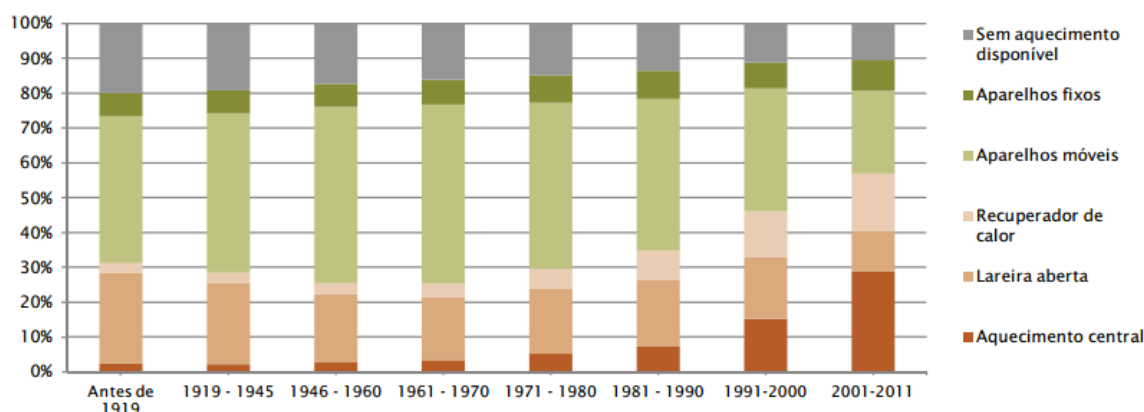
de climatização podem ser tomadas medidas ativas de redução do consumo através, por exemplo, da colocação de isolamento térmico nos edifícios.



Fonte: INE/DGEG - Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico (2010)

FIGURA 2.4 - REPARTIÇÃO DOS CONSUMOS DE ELETRICIDADE PELOS DIFERENTES USOS FINAIS [4]

Pode ainda verificar-se que ao longo das últimas décadas o número de habitações sem sistemas de aquecimento tem vindo a diminuir (de cerca de 20% em 1919 para aproximadamente 10% na década 2001-2011), o que reflete a crescente exigência com as condições de conforto. Verifica-se também a diminuição da utilização das tradicionais lareiras abertas a biomassa e dos aparelhos móveis (pouco eficientes) para aquecimento de espaços, em contraposição com os sistemas de aquecimento central que beneficiaram de uma expansão significativa nas últimas décadas (de cerca de 15% na década 1991-2000 para quase o dobro na década 2001-2011) (v. Fig. 2.5).



Fonte: INE, Censos 2011

FIGURA 2.5 - EVOLUÇÃO DO TIPO DE AQUECIMENTO DISPONÍVEL, POR ÉPOCA CONSTRUTIVA [5]

A presença de sistemas de ar condicionado em edifícios tem sido essencial no desenvolvimento económico de áreas com climas quentes. Ao longo dos últimos 30 anos, tem-se assistido ao crescimento económico de áreas onde dificilmente teria sido possível, sem a utilização de sistemas de climatização. O propósito destes equipamentos é proporcionar conforto térmico e uma qualidade do ar interior (QAI) aceitável para os utilizadores dos edifícios [59].

Na Europa, a grande maioria dos edifícios é ainda ventilado naturalmente. Porém, estudos sugerem que se espera um aumento do desconforto térmico em alguns locais da Europa, devido à ocorrência de eventos climáticos extremos e das alterações climáticas, o que poderá influenciar o aumento da utilização de sistemas de climatização [1]. A nível nacional verifica-se que a proporção de habitações detentoras destes equipamentos tem aumentado progressivamente nos edifícios de construção mais recente, representando já 18,9% na década 2001-2011 (v. Fig.2.6).

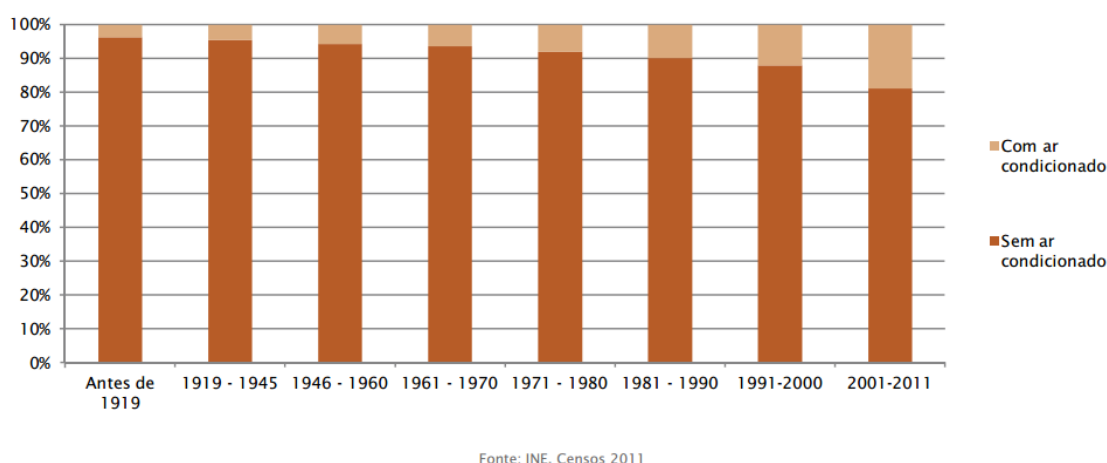


FIGURA 2.6 – DISTRIBUIÇÃO DE HABITAÇÕES COM SISTEMAS DE AR CONDICIONADO [5]

Apesar das mais-valias dos sistemas de climatização, numerosos estudos têm documentado taxas elevadas de insatisfação com o ambiente interior em muitos edifícios que possuem estes equipamentos. Problemas de saúde humana e reclamações quanto à qualidade do ar interior em edifícios mecanicamente ventilados são frequentemente relatados, devido essencialmente à falta de manutenção adequada ou ao mau dimensionamento do sistema [6].

2.2 Caracterização do setor dos edifícios

2.2.1 Enquadramento

No sector da construção, um dos principais desafios é o aumento das exigências ao nível do conforto no interior das habitações, o que leva ao aumento da potência dos equipamentos de climatização e que resulta no aumento do consumo energético. Uma das formas de reduzir este

consumo é a utilização de soluções construtivas pensadas de forma a tirar partido das condições ambientais e, assim, reduzir a utilização de sistemas de aquecimento e arrefecimento, sem descuidar o conforto térmico.

Tradicionalmente, a construção baseava-se nos recursos naturais existentes na região, no clima e na mão-de-obra disponível e as habitações refletiam o conhecimento das condições climáticas e dos materiais existentes na região. O desenvolvimento do setor levou à construção de edificações que não foram pensadas de forma a adequarem-se ao clima externo onde se inserem e que dependem, quase exclusivamente, de sistemas de climatização para proporcionar o conforto térmico aos utilizadores. Se a este facto se aliar um aumento da qualidade de vida e das exigências de conforto no interior das habitações, entende-se a utilização generalizada de equipamentos de climatização responsáveis pelo aumento insustentável do consumo energético nos edifícios [7].

O edificado europeu, em especial nos países situados mais a Sul, é composto essencialmente por edifícios antigos, construídos anteriormente à implementação de mecanismos legais relacionados com o conforto térmico, o que constitui um desafio de difícil resolução. Nestes edifícios, a melhoria de desempenho térmico resulta da implementação de medidas de mitigação, como a colocação de isolamento térmico [1]. Em Portugal, o sector residencial engloba cerca de 3,9 milhões de alojamentos, concentrados na faixa litoral do país (v. Fig. 2.7), construídos maioritariamente após 1970 (v. Fig. 2.8).

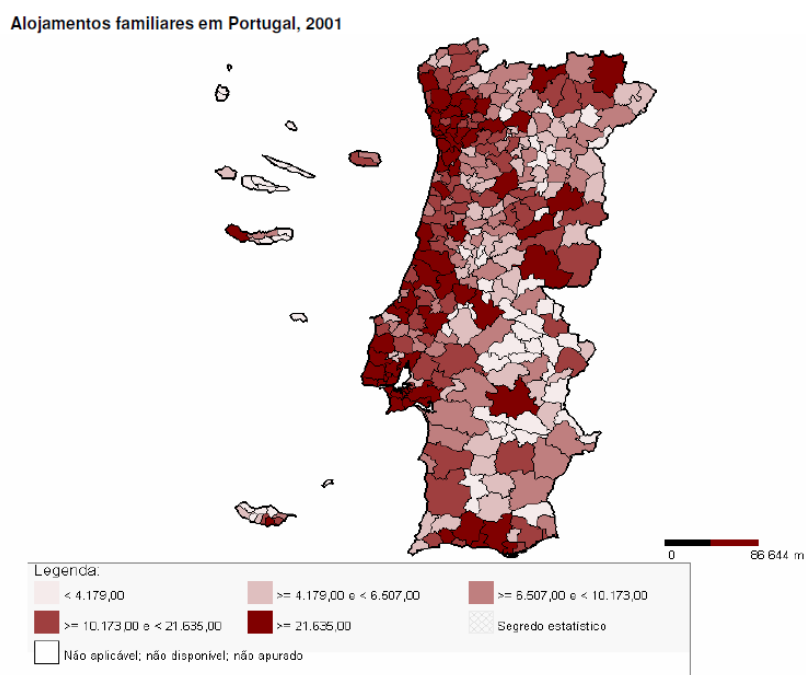


FIGURA 2.7 - DISTRIBUIÇÃO DOS ALOJAMENTOS FAMILIARES EM PORTUGAL [8]

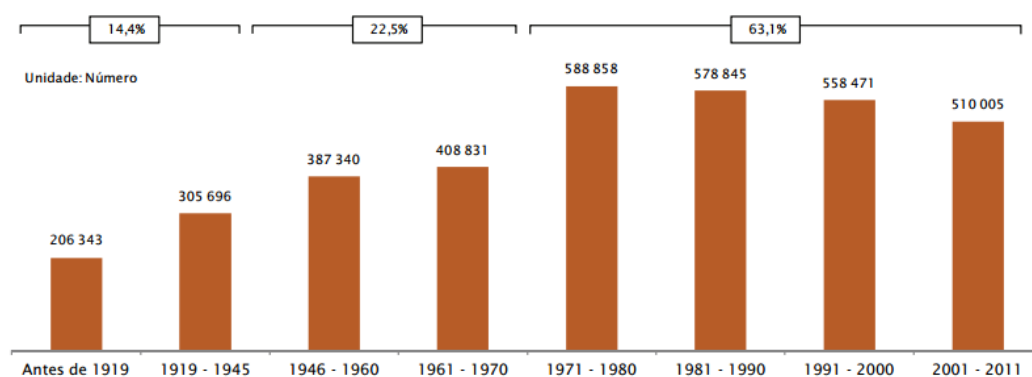
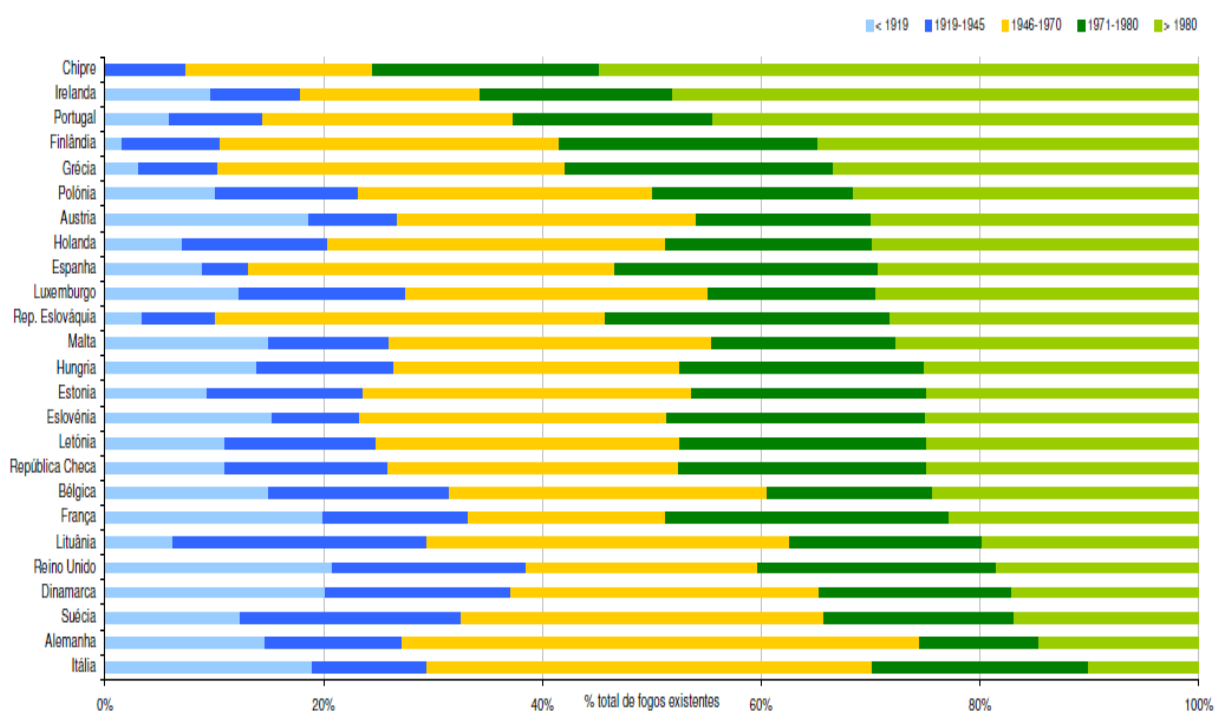


FIGURA 2.8 - NÚMERO DE EDIFÍCIOS POR ÉPOCA CONSTRUTIVA EM PORTUGAL [5]

Da análise da Figura 2.8 verifica-se um aumento do número de edifícios construídos a partir da década de 1970, o que coincidiu com a massificação do uso de betão armado na construção. Os edifícios anteriores a 1945 representam apenas 14,4% do número total de edifícios nacionais existentes em 2011, em contraposição com os 63,1% de edifícios construídos após a década de 1970 [5]. A nível europeu, assiste-se à mesma tendência verificada em Portugal, com a maior parte das edificações a serem construídas após a massificação do betão armado (v. Fig. 2.9).



Fonte: Housing Statistics in the European Union, 2004

FIGURA 2.9 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA IDADE DA CONSTRUÇÃO EXISTENTE NA UE [8]

2.2.2 Legislação

A preocupação mundial envolve atualmente esforços destinados à redução do consumo de energia e às emissões de dióxido de carbono (CO₂), produzidas maioritariamente pelos setores da indústria, transportes e edifícios. Este último setor é responsável por emissões de GEE consideráveis, das quais cerca de dois terços provêm de edifícios residenciais [4]. Quanto maior for o investimento de um país na sua eficiência energética, mais competitivo o país se tornará. Atualmente, a redução do consumo energético associado tanto à utilização como à construção dos edifícios, e o aumento da eficiência nos equipamentos de climatização são questões que têm despoletado a atenção científica e técnica e que se reflete na legislação nacional e europeia [9].

Neste contexto e de forma a assegurar simultaneamente as exigências ao nível do conforto térmico e da qualidade do ar interior, foi aprovado a nível nacional o Decreto-Lei nº 40/90 de 6 de Fevereiro, designado por Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE). Este foi o primeiro instrumento legislativo nacional a impor requisitos térmicos mínimos aos edifícios novos e sujeitos a grandes remodelações, ao nível da caracterização de desempenho energético dos mesmos e dos seus sistemas consumidores de energia. O diploma impunha a obrigatoriedade da aplicação de níveis mínimos de isolamento térmico em fachadas, pavimentos e coberturas. Em Abril de 1998 foi publicado o Decreto-Lei nº 118/98 conhecido como Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios (RSECE). Este diploma destinava-se a edifícios com consumos energéticos efetivos na climatização, nomeadamente edifícios de serviços e a edifícios residenciais detentores de equipamentos de climatização com potência nominal superior a 25 kW e veio substituir o Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RQSECE) [10].

A nível europeu, como forma de permitir aos Estados-Membros alcançar os compromissos assumidos com a assinatura do Protocolo de Quioto, surgiu no campo da eficiência energética em edifícios, a Diretiva Comunitária 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, designada por EPBD (do inglês *Energy Performance of Buildings Directive*). Esta Diretiva, revista em 2010 como Diretiva nº 2010/31/CE, impôs a todos os Estados-Membros a implementação de sistemas de certificação energética direcionado aos edifícios, através do estabelecimento de metodologias de cálculo do desempenho energético e da aplicação de requisitos mínimos para edifícios novos ou edifícios sujeitos a grandes obras de intervenção. Este instrumento legal introduziu parâmetros de redução do consumo energético e de emissões de dióxido de carbono, associadas ao setor dos edifícios, sem com isto comprometer o conforto térmico ou a qualidade do ar interior. A falta de harmonização nos resultados obtidos decorrentes da aplicação desta diretiva, deveu-se principalmente ao facto de não serem exigidos requisitos quantitativos e não se fixar uma metodologia padrão para o cálculo do desempenho energético dos edifícios [11].

A nível nacional e transpondo para a legislação portuguesa a Diretiva Comunitária, em 2006 foi revisto o quadro legislativo ao nível dos edifícios e foram reformulados o RSECE e RCCTE com a publicação do Decreto-Lei nº 79/2006 e do Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 Abril, respetivamente. A revisão do RSECE continuou a focar-se no mesmo tipo de edifícios, enquanto a revisão do RCCTE se direccionou para a indicação de regras a observar em todos os edifícios de habitação e serviços sem sistemas de climatização centralizados ou com sistemas de climatização de potência nominal inferior a 25 kW [10]. Da transposição da Diretiva Comunitária surgiu também a implementação de um sistema de certificação, capaz de classificar os edifícios em termos das suas características térmicas. Neste contexto, e a par da revisão do RSECE e do RCCTE, foi publicado o Decreto-Lei nº 78/2006 de 4 de Abril designado por Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE). Este diploma tem como finalidade não só assegurar as disposições legais presentes no RCCTE e no RSECE relativamente a medidas de eficiência energética, como também de certificar o desempenho energético e a qualidade do ar interior dos edifícios. Posteriormente, em 2013 surgiu o Decreto-lei nº 118/2013 que aprovou o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) [10].

2.2.3 O conforto térmico

A conceção de edifícios deve ter em conta o conforto térmico humano, independentemente das condições climáticas externas. A adequação do edifício ao clima e ao tipo de atividade que nele se pretende realizar potencia a racionalização de energia, diminuindo ou eliminando o recurso a aparelhos de climatização. A melhoria da performance energética das edificações traz benefícios para os utilizadores ao nível:

- do conforto, proporcionando condições de temperatura e humidade adequadas;
- da saúde, pois as características térmicas do edifício influenciam o aparecimento de doenças respiratórias e alergias devidas à presença de humidade ou a variações abruptas de temperatura;
- da economia, uma vez que a incorporação adequada de isolantes térmicos e de proteções solares permitem minimizar as necessidades de climatização;
- e do ambiente, promovendo a redução da exploração de recursos fósseis e a emissão de poluentes [12].

O conforto térmico nos edifícios é uma condição importante a alcançar para o bem-estar, produtividade e saúde dos seus ocupantes e engloba o conforto térmico e visual e a qualidade do

ar [13]. O desconforto é um indicador importante pois é o primeiro sintoma de alerta para o facto de as condições não serem adequadas.

De acordo com os principais organismos internacionais nesta matéria, pode definir-se conforto como “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” [14]. Assim, pode afirmar-se que o conforto térmico representa a satisfação das pessoas face às condições térmicas envolventes. Contudo, esta é uma definição ambígua e subjetiva, uma vez que a definição de conforto é influenciada diretamente por processos físicos e fisiológicos mas também psicológicos. Este não é um conceito exato que implique uma temperatura padrão, uma vez que depende de fatores quantificáveis (temperatura do ar, velocidade do ar, humidade, etc.) e de fatores não quantificáveis (estado mental, hábitos culturais, educação, etc.). As expectativas de conforto dependem também de algumas circunstâncias, tais como o local onde o sujeito se encontra, a atividade exercida ou mesmo a época do ano [13].

O RCCTE estabelece, a nível nacional, valores de referência a registar no interior dos edifícios relativos a temperatura e humidade de modo a garantir o conforto térmico. Para a estação de aquecimento deve verificar-se uma temperatura de 20 °C e para a estação de arrefecimento uma temperatura de 25 °C e 50% de humidade relativa. Deve ainda verificar-se uma taxa de renovação do ar de 0,6 renovações por hora para garantir a qualidade do ar interior [15].

2.2.3.1 Equilíbrio higrotérmico

O Homem é um animal homeotérmico, ou seja, a sua temperatura interna é sensivelmente constante, variando entre 36 °C e 37 °C. O organismo humano adquire energia através do metabolismo, mas apenas 20% dessa energia tem potencialidade de realizar trabalho, sendo que a restante é dissipada sob a forma de calor. Para uma pessoa permanecer saudável, o calor não deve ser perdido muito rápido ou muito lentamente e uma gama muito estreita de temperatura corporal deve ser mantida [16]. Assim, o indivíduo normal apresenta sensação de conforto térmico quando as trocas de calor entre o mesmo e a envolvente ocorrem naturalmente e sofre sensação de frio ou calor quando estas trocas ocorrem disfuncionalmente [17].

O conforto térmico pode ser determinado como um balanço energético entre as transferências de calor por condução, convecção e radiação e a taxa metabólica dos ocupantes de um determinado espaço. Se a taxa de saída de calor do indivíduo for superior à taxa de calor que entra no mesmo, a sensação será de “frio”. Por outro lado, se a taxa de saída de calor for inferior à taxa de entrada, a sensação será de “calor”, que resulta na produção de suor e que dará origem a fenómenos de evaporação [17].

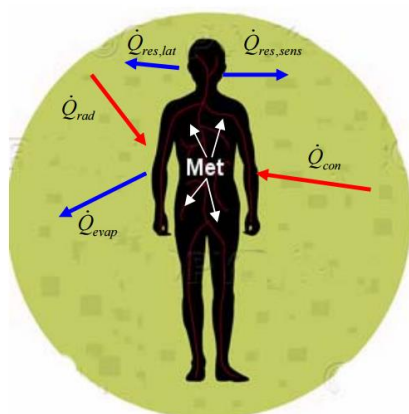


FIGURA 2.10 - TROCAS TÉRMICAS ENTRE O SUJEITO E A ENVOLVENTE [18]

Para que o indivíduo experiencie conforto térmico, a seguinte relação deve ser verificada:

$$M = R \pm C \pm E \pm S \quad (2.1)$$

onde, M representa a produção de calor interna (metabolismo), R representa as trocas por radiação, C representa as trocas por condução e convecção, E representa as trocas por evaporação e respiração e S representa o armazenamento interno.

O calor produzido por um indivíduo adulto em repouso é de cerca de 100 W. Como a maior parte deste calor é transferido para o meio ambiente através da pele, muitas vezes é conveniente caracterizar a atividade metabólica em termos de produção de calor por unidade de área da pele. Assim, o calor perdido pelo indivíduo em repouso é de cerca de $58,2 \text{ W m}^{-2}$ (admitindo que a pessoa tem uma área superficial de pele de cerca de $1,8 \text{ m}^2$) [19]. As taxas metabólicas podem ser determinadas em função da atividade física desenvolvida e são exemplificadas na Figura 2.11 (v. também Anexo I).

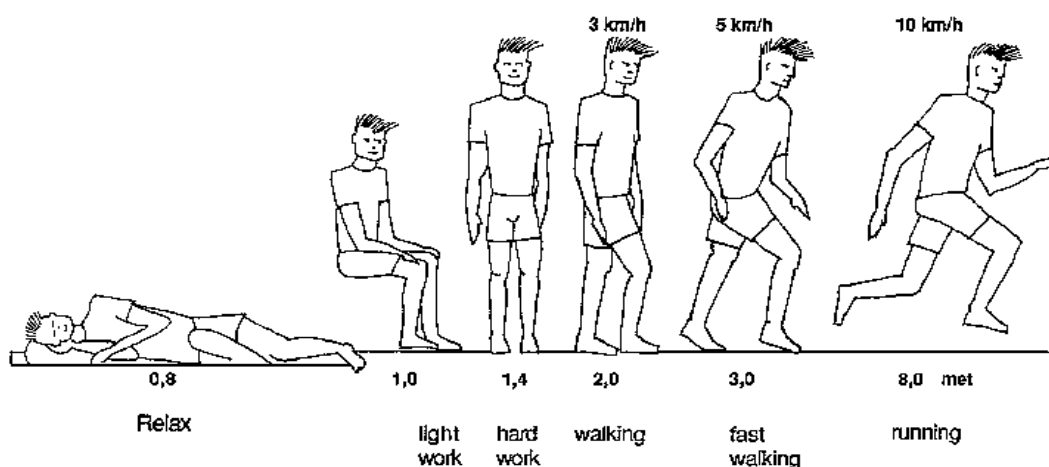


FIGURA 2.11 – ATIVIDADE METABÓLICA EM FUNÇÃO DA ATIVIDADE EXERCIDA [20]

2.2.3.2 Quantificação do conforto térmico

O conforto térmico é difícil de quantificar pois é altamente subjetivo e depende de uma série de fatores como a temperatura e velocidade do ar, a humidade relativa, a taxa metabólica ou o tipo de vestuário do indivíduo. Deve ainda ter-se em conta que a sensibilidade de cada indivíduo varia consoante o sexo, a fisiologia e a idade [17].

Numa tentativa de determinar o conforto térmico e apesar de existirem na bibliografia diversos outros modelos, na década de 1970, Ole Fangerⁱ desenvolveu uma metodologia conhecida como Voto Médio Previsível (em inglês *Predicted Mean Value* ou *PMV*). Esta metodologia foi posteriormente transformada na norma ISO 7730 e é atualmente a mais reconhecida na área [21]. Para o desenvolvimento desta metodologia, Fanger reuniu um grande número de indivíduos, colocando-os em câmaras climáticas sob condições de temperatura e humidade controladas, e os mesmos foram inquiridos acerca da sua sensação de conforto. Através desta recolha de dados, Fanger desenvolveu uma equação matemática, tendo em conta as condições fisiológicas e ambientais e que resultou numa escala de classificação de conforto que varia entre +3 (correspondente à sensação de Quente) e -3 (que corresponde à sensação de Muito Frio) (v. Tabela 2.1).

TABELA 2.1 - ESCALA PMV [6]

Sensação	Valor de PMV
Muito Frio	-3
Frio	-2
Ligeiramente frio	-1
Neutro	0
Ligeiramente morno	+1
Morno	+2
Quente	+3

Como já foi referido anteriormente, a sensação térmica humana está relacionada com o balanço térmico do corpo. Assim, o ser humano está em equilíbrio térmico quando a quantidade de calor produzida pelo corpo é proporcional à quantidade de calor perdido pelo mesmo. Quando se verifica esta condição pode afirmar-se que o indivíduo está em condições ideais de bem-estar e

ⁱ Ole Fanger (1934-2006), dinamarquês, foi professor na Technical University of Denmark, sendo um especialista reconhecido na área do conforto térmico.

portanto o valor de PMV será igual a 0. Do ponto de vista prático este valor não é atingível e considera-se admissível um desvio de $\pm 0,5$ [13].

Para o cálculo do índice PMV é necessário conhecer algumas variáveis, tais como a atividade metabólica (M), o isolamento providenciado pelo vestuário (I_{cl}), a temperatura do ar (t_a), a temperatura média radiante (\bar{t}_r), a velocidade do ar (v_a) e a humidade relativa (HR). A determinação de alguma destas variáveis (tais como a temperatura e velocidade do ar e a humidade relativa) pode ser facilmente realizada através de sensores, contudo a atividade metabólica e o efeito isolante do vestuário (v. Fig. 2.12 e Anexo II) podem ser difíceis de quantificar e são geralmente assumidos valores padrão.

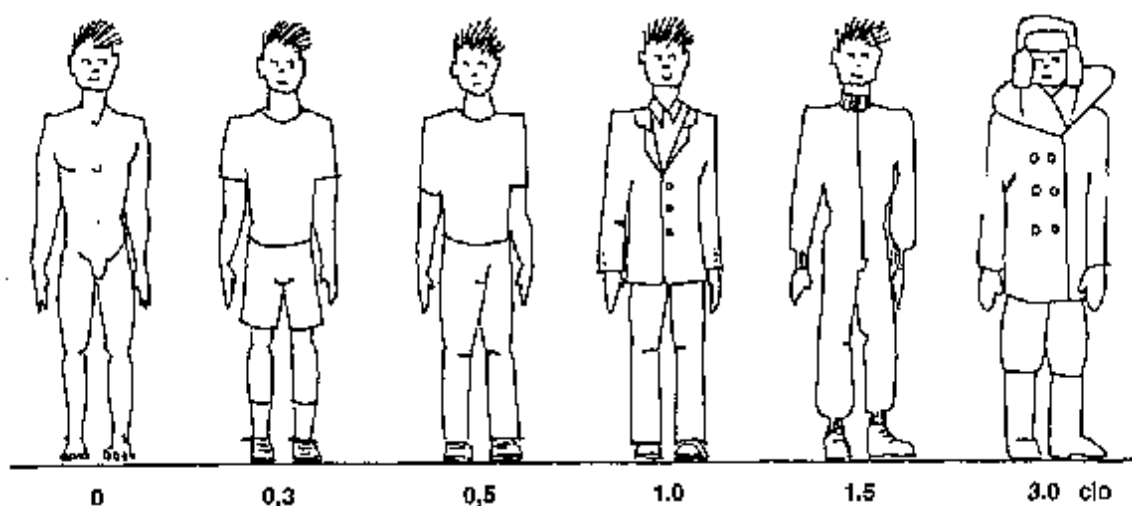


FIGURA 2.12 - EFEITO ISOLANTE DO VESTUÁRIO [20]

Por outro lado, a temperatura média radiante representa as trocas de radiação estabelecidas em função das diferenças de temperatura entre a superfície exterior dos indivíduos e a envolvente térmica e pode ser calculada analiticamente por:

$$\bar{t}_r^4 = t_1^4 F_{p-1} + t_2^4 F_{p-2} + \dots + t_n^4 F_{p-n} \quad (2.2)$$

onde t_i , $i = 1 \dots n$ representa a temperatura de cada uma das superfícies que constituem o espaço e F_{p-i} são os fatores de forma das superfícies em relação à superfície do utilizador do espaço (v. Anexo III). Esta formulação geral admite simplificações e formulações alternativas que utilizam a temperatura e velocidade do ar em detrimento das temperaturas superficiais acima mencionadas [13].

Finalmente, o índice PMV pode calcular-se em função dos parâmetros mencionados anteriormente através da equação:

$$PMV = [0,303 \exp (-0,036M) + 0,028] S \quad (2.3)$$

onde, S representa a carga térmica do corpo, em $W m^{-2}$, definida como a diferença entre o calor interno produzido e o calor produzido quando o indivíduo se encontra numa situação de conforto, e M representa a taxa metabólica, em $W m^{-2}$.

A carga térmica, S , pode ser determinada pela equação:

$$S = (M - Q) - 0,0014 M (34 - t_a) - 3,05 \times 10^{-3} [5733 - 6,99 (M - Q) - p_a] - 0,42 (M - Q - 58,15) - 1,72 \times 10^{-5} M (5867 - p_a) - 39,6 \times 10^{-9} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (2.4)$$

onde,

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - Q) - 0,155 I_{cl} [39,6 \times 10^{-9} f_{cl} [(t_{cl} + 274)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - y_T)] \quad (2.5)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 (t_{cl} - y_T)^{0,25}, A > 12,1\sqrt{v_a} \\ 12,1\sqrt{v_a}, A \leq 12,1\sqrt{v_a} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$A = 2,38(t_{cl} - y_T)^{0,25} \quad (2.7)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,0 + 0,2 I_{cl}, I_{cl} \leq 0,5 clo \\ 1,05 + 0,1 I_{cl}, I_{cl} > 0,5 clo \end{cases} \quad (2.8)$$

e onde f_{cl} representa o fator área do vestuário (-); h_c representa o coeficiente de transferência de calor por convecção, em $W m^{-2} K^{-1}$; I_{cl} representa a resistência térmica do vestuário, em clo; M representa a taxa metabólica, em Met; p_a representa a pressão parcial de vapor de água no ar, em Pa; t_{cl} representa a temperatura superficial do vestuário, em K; t_r representa a temperatura média radiante, em K; y_T e t_a representam a temperatura do ar, em K; v_a representa a velocidade do ar, em $m s^{-1}$; Q representa o trabalho realizado pelos músculos para realizar uma tarefa e HR representa a humidade relativa [22].

Associado ao índice PMV surge frequentemente um outro, designado por PPD (do inglês *Predicted Percentage of Dissatisfied*) ou Percentagem Previsível de Insatisfeitos e que traduz a percentagem de indivíduos insatisfeitos com as condições térmicas do meio onde se encontram. Este índice pode ser determinado em função do índice PMV através da expressão abaixo, e geralmente considera-se satisfatório que este seja inferior a 10% para espaços interiores [14].

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,3353PMV^4 + 0,2179PMV^2)} \quad (2.9)$$

Na tentativa de se obter um ambiente interior confortável termicamente, as normas sobre conforto térmico em edifícios são uma ferramenta importante. Numa fase inicial, estas normas tinham como principal objetivo definir as condições ideais de conforto térmico, sem ter em conta os consumos energéticos associados. Porém, a crescente preocupação com as questões ambientais e com a necessidade de se atingir um desenvolvimento sustentável, levou a que estas normas de conforto fossem adaptadas de forma a que se proporcione o conforto térmico desejado com o menor consumo energético possível [23].

2.2.4 Evolução histórica das soluções construtivas

A evolução tecnológica e a investigação (sobretudo no campo dos materiais) tem conduzido à evolução do setor da construção. Tendo em conta a grande diversificação de soluções e sistemas construtivos, a seleção pelo mais adequado deve satisfazer alguns requisitos. Um destes requisitos é o conforto térmico, uma vez que o comportamento térmico do edifício é condicionado pela solução construtiva e determina a quantidade de energia necessária na climatização, acarretando custos económicos e ambientais [24]. O património construído constitui uma referência histórica importante, tanto do ponto de vista social como técnico, uma vez que fornece elementos que permitem compreender a adaptação humana ao meio que habita desde o início dos tempos. A habitação passou de meio de abrigo às intempéries a um local de conforto e comodidade, tendo por base soluções e técnicas construtivas sofisticadas [25].

Em Portugal, as soluções construtivas empregues em edifícios são bastante similares, embora se verifiquem diferenças devidas ao clima, à localização geográfica, à disponibilidade de materiais ou ao estilo de vida das populações [24]. Tipicamente, poderiam ser encontradas casas com fachadas em granito no norte litoral, substituído pelo micaxisto, quartzito e calcário a leste. No centro do país era comum a utilização de rochas calcárias e no Alentejo, tradicionalmente, encontrar-se-iam as fachadas de pedra ou adobeⁱⁱ caiadas de branco. Desde as primeiras construções documentadas em Portugal, até acerca de 50 anos atrás, os sistemas construtivos para habitação eram caracterizados por serem pesados, com paredes exteriores com espessuras

ⁱⁱ Pequeno tijolo regular de argamassa de barro com areia e palha, com forma de tijolo e seco ao sol.

médias de 0,40 m em pedra ou adobe e os pavimentos ligeiros em madeira. Pela inexistência de formas eficazes de transporte, os materiais utilizados dependiam das características litológicas da zona. Em regiões onde a pedra era escassa, as paredes exteriores eram constituídas por terra. Estas habitações, geralmente rurais, eram características de populações com escassos recursos económicos e apresentavam uma baixa resistência aos elementos climáticos, sendo facilmente degradadas pela humidade, o que explica o seu assentamento em pilares de pedra ou tijolo, elevando-as do terreno [26].

Historicamente, pode afirmar-se que em Portugal após o terramoto de 1755 começou a pensar-se a construção numa outra perspetiva com o aparecimento de uma nova forma de construir, caracterizada essencialmente pela simplificação dos traços arquitetónicos e pela ausência de continuidade estrutural. Estas construções eram caracterizadas por alvenaria em pedra irregular argamassada com argila, paredes interiores de tabiqueⁱⁱⁱ com fraca resistência, caboucos^{iv} com pedra e pavimentos em madeira [27]. Com o surgimento do betão armado, por volta de 1930, os pavimentos de madeira passaram a lajes maciças. Começaram também a ser utilizadas vigas de betão armado ao nível do teto para facilitar a abertura de espaços maiores e a alvenaria de tijolo tornou-se comum [28]. Entre as décadas de 1930 e 1940, surgiram as primeiras estruturas integralmente em betão armado, porém só a partir de 1950 a sua expansão começou a ser significativa. Estas novas construções caracterizavam-se por estruturas de betão, paredes exteriores duplas de tijolo, divisórias interiores de tijolo simples e pavimentos de lajes maciças em betão armado [29]. A partir da década de 60 assistiu-se a uma diversificação na variedade de soluções estruturais cujas principais características eram a variedade de pavimentos empregues e a apresentação de aberturas maiores para as janelas. Contudo, as paredes exteriores continuaram a ser em alvenaria dupla de tijolo [30].

A solução construtiva mais comumente utilizada nas últimas cinco décadas é constituída por paredes exteriores de alvenaria dupla de tijolo, paredes interiores em alvenaria de tijolo simples e lajes constituídas por vigotas pré-reforçadas. O enraizamento desta solução, que pouco tem evoluído ao longo dos anos, deve-se em larga medida ao seu custo mais baixo em detrimento de outras soluções, à baixa qualificação dos operários de construção e à falta de formação dos técnicos do setor [24].

ⁱⁱⁱ Paredes divisórias ou de compartimentação

^{iv} Caixa aberta no terreno, onde se implanta as fundações de uma construção

2.2.5 Os principais elementos construtivos

As fachadas

Em Portugal, e sobretudo nas últimas décadas, a conceção de fachadas tem sofrido uma evolução significativa. Anteriormente a 1940, as paredes eram tipicamente construídas em tijolo maciço ou pedra e eram caracterizadas por elevadas espessuras. Na década de 1950 começaram a ser construídas as primeiras paredes duplas com a fachada exterior de pedra e a interior em alvenaria de tijolo. Na década seguinte, substituiu-se o pano exterior de pedra por alvenaria de tijolo vazado, o que aligeirou a constituição das paredes e na década de 70, manteve-se a mesma constituição mas reduziu-se a espessura do pano exterior. Sensivelmente a partir da década de 80, começou a introduzir-se isolamento térmico na caixa-de-ar, de forma a preenchê-la total ou parcialmente. A partir dos anos 90 foram desenvolvidos mecanismos de isolamento térmico pelo exterior e pelo interior, sendo que o isolamento pelo interior geralmente é aplicado em situações de reabilitação (v. Fig. 2.13) [31].

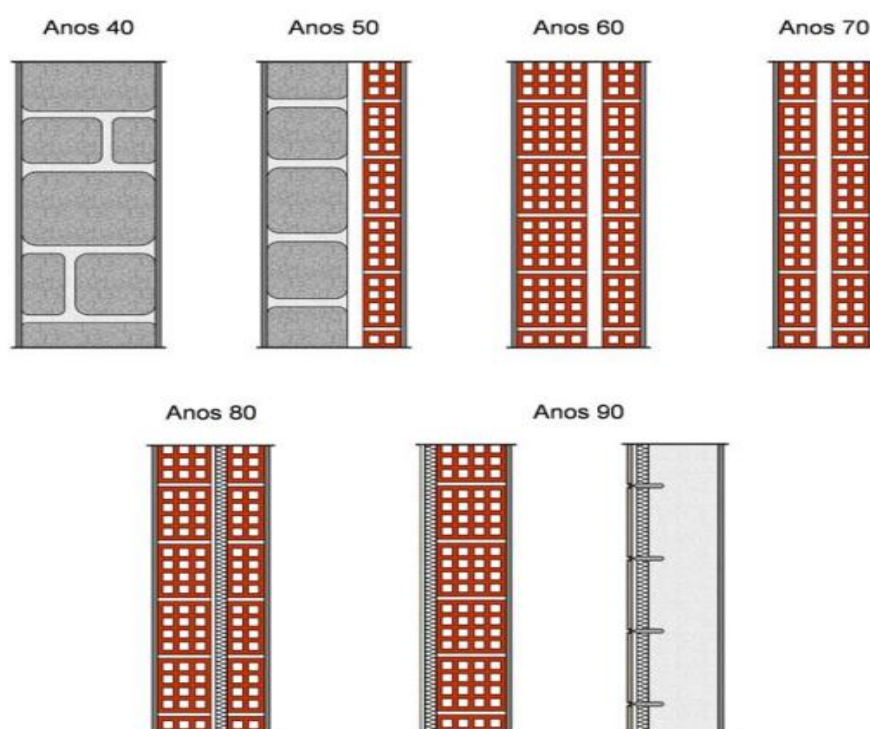


FIGURA 2.13 - EVOLUÇÃO DA CONCEÇÃO DE FACHADAS EM PORTUGAL [31]

O revestimento mais utilizado nas fachadas exteriores em todas as épocas construtivas é o reboco, por ser o mais barato. Porém o revestimento em pedra assumiu alguma importância em edificações anteriores a 1919 (v. Fig. 2.14).

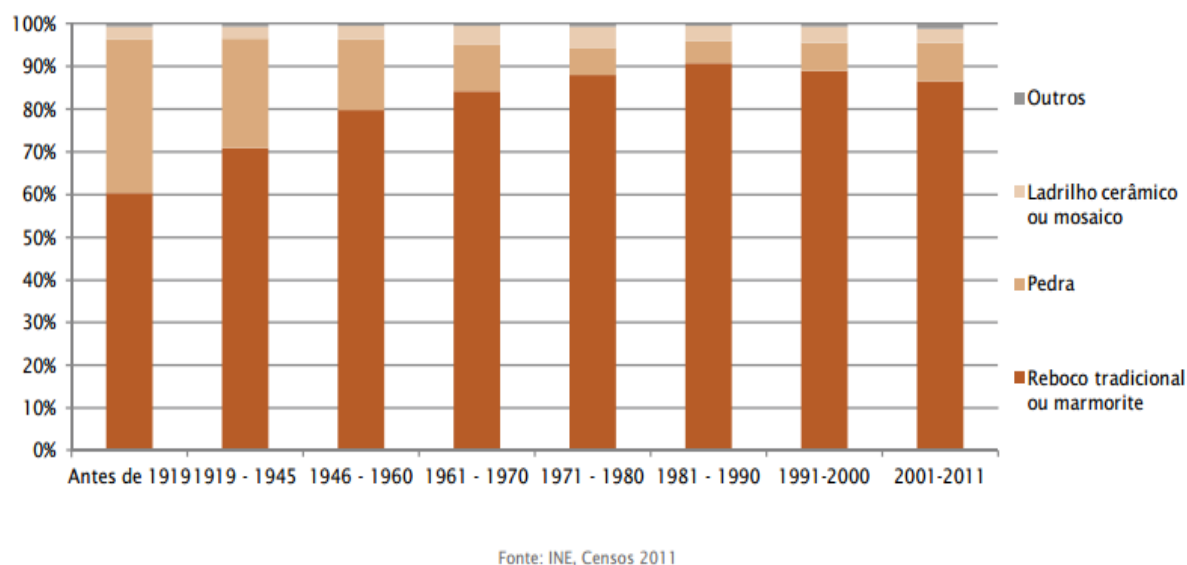


FIGURA 2.14 - REVESTIMENTO DE FACHADAS EXTERIORES POR ÉPOCA CONSTRUTIVA [5]

Os pavimentos

Os pavimentos são geralmente colocados sobre o vigamento do piso e constituem uma camada resistente e esteticamente agradável aos utilizadores. A escolha do pavimento prende-se com a utilização dada ao espaço e deve respeitar alguns critérios de comodidade, durabilidade e segurança [32]. Existem diferentes tipos de revestimento, desde o comum revestimento cerâmico com mosaico, ao revestimento sintético com os linóleos, passando pelo revestimento natural de madeira, com elevada capacidade isolante, e pelo revestimento têxtil com os pavimentos alcatifados [32].

Nas últimas décadas tem-se assistido a uma maior preocupação com o conforto nas habitações, por conseguinte, o isolamento dos pavimentos tem-se tornado de grande importância. Esta é uma prática que revela bom senso, uma vez que as perdas térmicas pelo pavimento podem ser consideráveis.

As coberturas

As coberturas têm a função de proteger as edificações dos elementos climáticos e devem ainda proporcionar conforto e segurança aos utilizadores do espaço. A sua forma e orientação exercem um papel decisivo no edifício, sendo que em Portugal predomina a cobertura inclinada revestida a telha cerâmica (v. Figura 2.15).

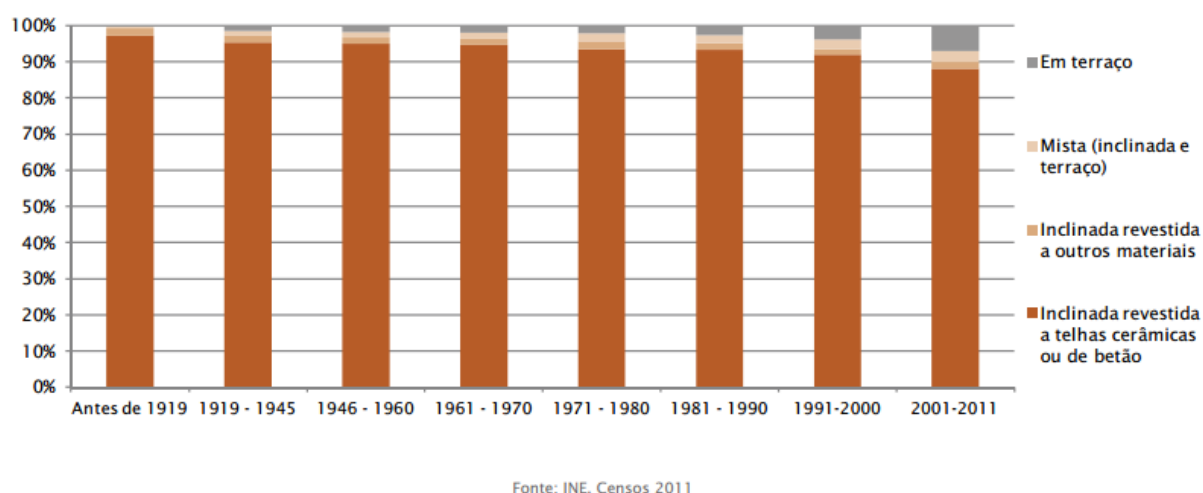


FIGURA 2.15 - TIPO DE COBERTURA POR ÉPOCA CONSTRUTIVA [5]

A telha cerâmica permite a aplicação em várias formas e estilos arquitetónicos e apresenta elevada durabilidade e desempenho perante os elementos climáticos. A sua disponibilidade e custo tornam-na no material preferencial para o revestimento de coberturas em edifícios [33]. A telha, tipicamente era suportada por vigas de madeira, porém com o advento do betão armado passou a ser suportada por vigas de betão e, atualmente é já comum a utilização de perfis metálicos como suporte. Nas últimas décadas tornou-se também comum a utilização de um forro entre o desvão e a face interior das telhas, que serve como proteção. Este forro pode apresentar-se com alguma flexibilidade, através de feltros betuminosos ou filmes plásticos, ou como elemento rígido, através de placas pré-fabricadas em cerâmica, betão ou placas de madeira ou seus derivados [33].

Os vãos envidraçados

As superfícies envidraçadas desempenham um papel muito importante na performance térmica do edifício. Se por um lado, podem contribuir para a entrada de radiação solar, por outro, podem ser locais através dos quais há dissipação de calor [2]. As áreas abertas para colocação de janelas são necessárias como forma de aproveitamento de iluminação natural, porém a colocação de superfícies envidraçadas em excesso contribui para a diminuição da inércia térmica e para o aumento das perdas de calor para o exterior. Na parte exterior de um edifício deve ter-se em consideração a relação entre superfície aberta e fechada. Na arquitetura tradicional esta relação variava em função do clima, sendo que pequenas aberturas eram geralmente associadas a climas quentes e secos e grandes aberturas a climas frios. Nos climas temperados, tal como em Portugal, as soluções são mais flexíveis [26].

O conceito de janela evoluiu radicalmente desde meados do século XX com a introdução de novos materiais, com o aperfeiçoamento de perfis, selantes, ferragens e com o aparecimento de vidros com tratamentos especiais. Por razões económicas e de espaço, as janelas de correr rapidamente se impuseram e os outrora comuns materiais, como a madeira e o ferro, deram lugar ao PVC e ao alumínio. Com a disseminação da incorporação de janelas em edifícios surgiram também os sistemas de proteção solar, como estores e persianas, e o desenvolvimento no campo dos envidraçados foi tal que, atualmente, é recomendada a aplicação de vidros duplos nos envidraçados de espaços habitados ou climatizados como forma de minimizar as perdas de calor. Em climas mais frios recomenda-se a colocação de caixilharia com corte térmico^v e é atualmente comum a utilização de vidro laminado que permite a proteção contra a radiação ultravioleta, melhorando o isolamento acústico [26]. Apesar do isolamento das habitações ser um dos fatores que mais contribui para a sua eficiência energética, verifica-se que, a nível nacional, a utilização de isolamentos térmicos nos vãos envidraçados ainda é reduzida, dado que mais de 70% das habitações incorpora ainda vidro simples [34].

Componentes dos envidraçados

Vidro

O vidro confere um fraco isolamento térmico às edificações e as áreas envidraçadas constituem, por isso, zonas propícias a trocas de calor. No inverno, o elevado coeficiente de transmissão térmica do vidro leva a perdas de calor por condução elevadas e no verão, as zonas envidraçadas são zonas através das quais os ganhos solares se tornam excessivos, levando a situações de desconforto.

Tradicionalmente, as janelas eram constituídas por apenas um pano de vidro. Contudo, como forma de conferir a estes elementos capacidades isolantes, tornou-se comum a utilização de vidros constituídos por múltiplos panos (duplos, triplos e até mesmo quádruplos). Com a introdução de dois panos foi possível aumentar a resistência térmica do vidro para cerca do dobro (reduzindo o valor de U para metade) e ao introduzir-se um terceiro ou um quarto pano, o coeficiente de transmissão térmica foi diminuído ainda mais, embora numa proporção cada vez menor. A introdução de panos numa janela é limitada não apenas por questões físicas, mas também devido aos custos, sendo possível substituir os panos por películas plásticas, reduzindo o coeficiente de transmissão térmica sem aumentar excessivamente a espessura da janela. Para além disso, este tipo de película pode ainda possuir características de baixa emissividade que permite a passagem da radiação com pequeno comprimento de onda (como a radiação solar) e impedindo a passagem da radiação com grande comprimento de onda. Ou seja, a radiação solar

^v Caixilharia em que os elementos exteriores estão separados dos elementos interiores por um material de baixa condutibilidade térmica.

penetra nos compartimentos das habitações, aquecendo as superfícies e os objetos presentes no interior que ao aumentarem a sua temperatura emitem radiação de grande comprimento de onda que é impedida de sair para o exterior pela película de baixa emissividade. Assim, a utilização deste tipo de vidro durante o inverno é bastante útil, visto reter o calor no interior das habitações, contudo durante o verão poderá levar a situações pontuais de sobreaquecimento [35].

Em envidraçados com múltiplos panos de vidro, o espaço entre panos era tipicamente preenchido com ar. Contudo, com a necessidade de diminuir as perdas de calor ocorridas através dos envidraçados, os espaços de ar passaram a ser preenchidos por gases pouco condutores ou mais viscosos, reduzindo significativamente as trocas de calor por condução através do gás e diminuindo o valor de U para toda a janela [35].

Caixilharia

A caixilharia tem como objetivo garantir a estanquicidade dos vãos e suportar os panos de vidro. Atualmente, o material mais utilizado em caixilharia é o alumínio, embora a madeira continue ainda a ser utilizada em reabilitação de edifícios antigos e o PVC é cada vez mais usado em novas construções.

A grande desvantagem do alumínio, como material de caixilharia, é o facto de apresentar uma elevada condutibilidade térmica. Contudo, é possível melhorar bastante o desempenho térmico dos caixilhos em alumínio, recorrendo para o efeito a perfis de alumínio com rutura da ponte térmica. A utilização deste tipo de caixilharia, para além de melhorar o desempenho térmico da janela, evita também problemas de condensações no interior do caixilho. Os caixilhos de madeira têm uma performance bastante satisfatória, devido às propriedades isolantes da madeira. Todavia, a utilização de peças de metal para reforçar as janelas, compromete o seu desempenho térmico. A menor durabilidade e maior necessidade de manutenção contribuem para o desuso deste material em caixilharia. Os caixilhos em PVC podem ser equiparados aos caixilhos de madeira, no que diz respeito ao isolamento térmico [35].

Sombreamento

A colocação de sombreamento nos edifícios de habitação é essencial. A falta de controlo dos ganhos solares durante o verão resultaria em necessidades elevadas de energia para arrefecimento e em excessos de luminosidade em algumas zonas envidraçadas. As proteções solares devem caracterizar-se por altas capacidades refletivas e baixas capacidades de absorção, recorrendo para isso a cores claras.

Os tipos de proteção solar mais utilizados em edifícios de habitação, são os meios de sombreamento fixos (palas horizontais e verticais) e os dispositivos amovíveis, que podem ser ativados pelos utilizadores (estores, telas e portadas) e que tanto podem ser colocados pelo exterior como pelo interior [35].

Importância da orientação

O dimensionamento adequado de áreas envidraçadas em função da orientação solar, contribui consideravelmente para o conforto térmico das habitações. A proporção adequada de áreas envidraçadas tem em consideração a variação do percurso do sol ao longo do ano, determinando a capacidade de entrada da radiação solar nos espaços interiores e a captação de calor, contribuindo para o conforto dos espaços interiores e reduzindo a fatura energética [36].

Como não são desejados ganhos solares durante os meses de verão, mas são extremamente bem-vindos durante o inverno, a orientação Sul é a mais benéfica. Qualquer envidraçado orientado a Sul permite a entrada de radiação durante os meses em que o sol está mais baixo e elimina a entrada dos raios solares quando está mais alto. As áreas envidraçadas orientadas a Sul devem ser protegidas por sistemas de sombreamento exterior que permitam controlar o grau de luminosidade e a quantidade de raios solares diretos que penetram a habitação [36]. Nos vãos envidraçados orientados a Nascente e a Poente não se verifica uma diferença acentuada do ângulo solar para a orientação do vão. Durante o inverno, quando os ganhos solares são bem-vindos, estes vãos servem para deixar entrar todo o calor do sol, porém, durante os meses mais quentes, sobretudo a orientação a Poente necessita de ser sombreada pelo exterior, uma vez que está exposta a ganhos solares numa altura em que estes não são bem-vindos. Por esta razão, é importante que o dimensionamento dos vãos com a orientação Poente seja mais conservadora [36]. As áreas envidraçadas orientadas a Norte têm um peso importante no balanço energético do edifício, porque são áreas responsáveis por perdas energéticas. Em edifícios de habitação, estes vãos permitem garantir iluminação natural difusa, evitando o excesso de luz solar direta [36].

2.2.6 Balanço térmico dos edifícios

Os edifícios estão sujeitos à passagem de luz, ar, ruído e energia, entre os ambientes interior e exterior. A envolvente exterior do edifício engloba paredes, coberturas, pavimentos, janelas e portas, uma vez que é através destes elementos que decorrem as transferências de calor entre o exterior e o interior do edifício. A quantificação destas trocas torna-se importante para que sejam identificados os pontos críticos de perdas ou entradas de calor indesejáveis e/ou excessivas.

2.2.6.1 Variáveis a considerar

A transmissão de calor através da envolvente dos edifícios, quer sejam as perdas de calor no inverno quer os ganhos no verão, são fenómenos que muito influenciam o comportamento térmico dos edifícios. A transmissão de calor depende fortemente das variáveis climáticas a considerar, da localização e da orientação do próprio edifício.

Em termos de transferência de calor, as variáveis climáticas que mais influenciam os edifícios são a temperatura do ar exterior e a radiação solar. A temperatura do ar induz as trocas de calor através da envolvente e estabelece fluxos energéticos do interior para o exterior no período de inverno e no sentido inverso no período de verão. A redução de perdas no inverno é uma das medidas mais eficazes para melhorar as condições de conforto no interior dos edifícios e resulta geralmente da utilização de isolamento térmico na envolvente e da utilização de vidros duplos nos vãos envidraçados. A outra variável de interesse é a radiação solar, pois assume um papel importante no conforto térmico de qualquer edifício. Se no inverno, a radiação solar constitui uma fonte de calor importante, contribuindo para o aumento da temperatura interior, no verão torna-se numa fonte de calor a evitar [37].

Por outro lado, a forma do edifício tem um forte impacto no desempenho energético do mesmo. A necessidade de aquecer uma habitação no inverno deve-se ao facto de o calor gerado internamente ser continuamente perdido para o exterior através das superfícies externas do edifício. Assim, para que a habitação seja energeticamente eficiente, a relação superfície/volume deverá ser baixa pois quanto maior for a superfície em contacto com o exterior, maior será a transferência de calor [2]. A localização do edifício é também importante. O país está dividido em três zonas climáticas de inverno (I_1, I_2, I_3) e três zonas climáticas de verão (V_1, V_2, V_3). Os critérios de delimitação destas zonas têm por base as condições interiores de referência, (20 °C no inverno e 25 °C no verão). A classificação das zonas climáticas de inverno centra-se no número de graus-dias de aquecimento (GD) (v. Tabela 2.2) enquanto que a delimitação das zonas climáticas de verão se baseia na temperatura exterior de projeto de verão ($\theta_{ext,v}$) (v. Tabela 2.3) [38].

TABELA 2.2 - CRITÉRIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ZONA CLIMÁTICA DE INVERNO [39]

Critério	$GD \leq 1300$	$1300 < GD \leq 1800$	$GD > 1800$
Zona	I_1	I_2	I_3

TABELA 2.3 - CRITÉRIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ZONA CLIMÁTICA DE VERÃO [39]

Critério	$\theta_{ext,v} \leq 20 \text{ °C}$	$20 \text{ °C} < \theta_{ext,v} \leq 22 \text{ °C}$	$\theta_{ext,v} > 22 \text{ °C}$
Zona	V_1	V_2	V_3

Na Figura 2.16 encontra-se a delimitação gráfica das zonas climáticas de inverno e verão para o território nacional.

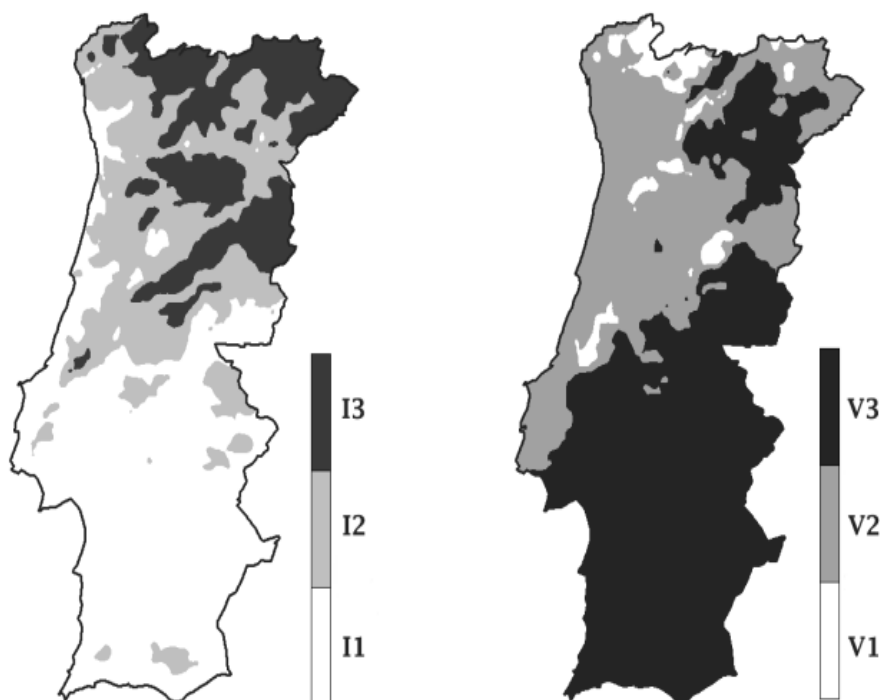


FIGURA 2.16 - ZONAS CLIMÁTICAS DE INVERNO E VERÃO PARA PORTUGAL CONTINENTAL [39]

Os dados climáticos de referência estão listados por concelho e fornecem dados sobre o número de graus-dias de aquecimento, a duração da estação de aquecimento, a temperatura externa de projeto ou a amplitude térmica. Deve também considerar-se o efeito da altitude e da proximidade com o litoral, que deve ser corrigido [38].

Importa também conhecer a orientação do edifício pois o Sol constitui uma fonte de calor importante quer em termos energéticos quer em termos da sua posição ao longo do ano. Como forma de maximizar os ganhos solares ou de restringir a entrada de radiação, torna-se importante conhecer os diferentes percursos do Sol. Na Figura 2.17 apresenta-se o percurso solar ao longo do ano [37].

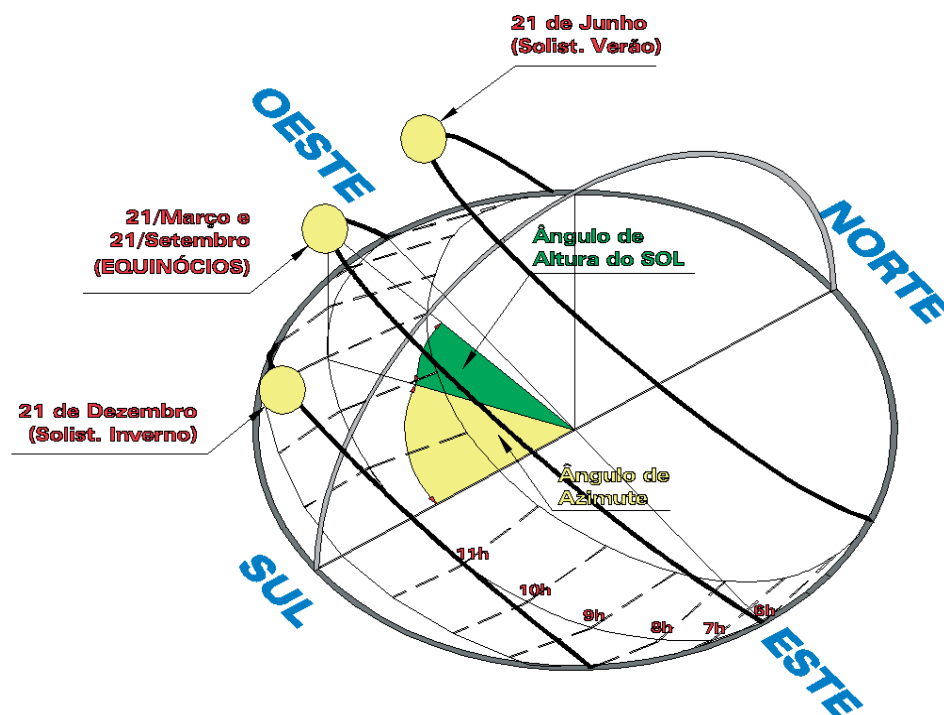


FIGURA 2.17 - PERCURSOS DO SOL AO LONGO DO ANO [37]

Tal como foi mencionado anteriormente, a orientação é importante para o aproveitamento da energia solar contribuindo para o bom desempenho energético do edifício. Em Portugal, de acordo com a situação geográfica, a orientação a Sul é aquela que recebe maior radiação solar ao longo do dia sendo, portanto, a orientação privilegiada para a maximização dos ganhos solares. Por oposição, a orientação a Norte será aquela que recebe menor quantidade de radiação solar direta, podendo mesmo em algumas situações não receber qualquer radiação.

2.2.6.2 Mecanismos de troca de calor

Para entender a ocorrência de trocas de calor num edifício importa ainda compreender o fluxo de calor através dos mecanismos de condução, convecção e radiação (v. Fig. 2.18). Independentemente do mecanismo, o calor flui sempre dos pontos mais quentes para os mais frios, até que já não exista uma diferença de temperaturas. Numa habitação, isto significa que no inverno, o calor flui diretamente dos espaços aquecidos para sótãos sem aquecimento, garagens, e até mesmo para o exterior. Durante o verão, o calor flui, geralmente, a partir do exterior para o interior de uma habitação [40].

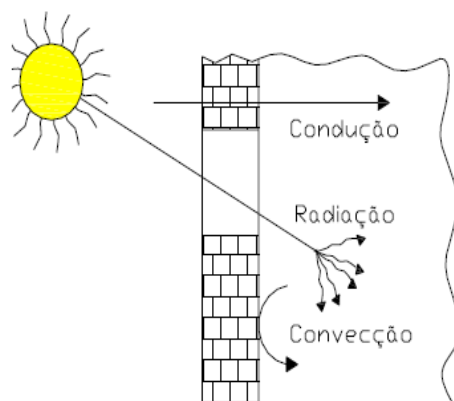


FIGURA 2.18 - MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR [18]

Condução

A transferência de calor por condução ocorre em sólidos ou fluidos e baseia-se na movimentação aleatória dos átomos, moléculas e/ou elétrons constituintes de um material (sólido, líquido ou gás).

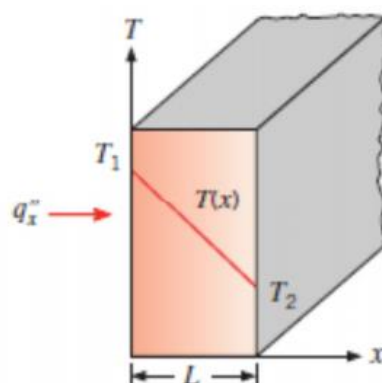


FIGURA 2.19 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO [41]

O fluxo de calor decorre sempre na direção da redução da temperatura. Nos edifícios, este é o principal mecanismo de transferência de calor e depende da condutibilidade térmica dos materiais, λ , em $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, e da espessura do elemento da envolvente x , em m, e pode ser avaliada pela Lei de Fourier:

$$\dot{Q} = -(\lambda A) \frac{dT}{dx} \quad (2.10)$$

onde, \dot{Q} representa o fluxo de calor por condução, em J s^{-1} ; A representa a área do elemento, em m^2 ; $\frac{dT}{dx}$ representa o gradiente de temperatura, em K m^{-1} .

Convecção

O mecanismo de transmissão de calor por convecção tem por base a transmissão de energia vibracional de partículas elementares de maior temperatura, para partículas elementares adjacentes a menor temperatura. A diferença entre a convecção e a condução é que, neste caso, o meio está em escoamento, logo ocorre transmissão de calor por convecção quando a transferência de calor por condução ocorre num meio em escoamento. A transmissão de calor por convecção aumenta na medida em que aumenta a velocidade do fluxo do fluído e pode ser classificada em natural (gerada internamente devido a diferenças de temperatura) ou forçada (se o fluxo for produzido por fontes externas) [41]. Através da Lei do Arrefecimento de Newton pode avaliar-se a transmissão de calor por convecção:

$$\dot{Q} = h A (T_w - T_{\infty}) \quad (2.11)$$

onde, \dot{Q} representa o fluxo de calor por convecção, em J s⁻¹; h representa o coeficiente de transferência de calor por convecção, em W m⁻² K⁻¹; T_w representa a temperatura da superfície sólida que contacta com o fluido, em K; T_{∞} representa a temperatura do fluido, num local suficientemente longe da parede para que o seu valor não seja afetado pela presença da parede, em K.

Radiação

A transmissão de calor por radiação ocorre uma vez que um corpo a uma dada temperatura emite e recebe radiação eletromagnética. Para que ocorra este tipo de transmissão de calor não é necessário um meio físico, podendo ocorrer mesmo no vácuo, e apenas é necessária a existência de duas superfícies a diferentes temperaturas [41]. A lei que permite avaliar a emissão de energia por um corpo negro (o corpo que emite a máxima radiação e absorve toda a radiação que nele incide) é a Lei de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_{max} = A \sigma T^4 \quad (2.12)$$

onde, \dot{Q}_{max} representa o fluxo de calor máximo emitido por radiação, em J s⁻¹; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); T representa a temperatura absoluta da superfície emissora, em K e A representa a área da superfície através da qual se dá a troca de energia por radiação, em m².

Deve salientar-se que, contrariamente aos corpos negros, considerados ideais do ponto de vista da radiação, os corpos reais não são negros e possuem uma determinada emissividade (ϵ). Assim, a potência calorífica real emitida por radiação por um corpo é dada por:

$$\dot{Q}_{max} = \epsilon A \sigma T^4 \quad (2.13)$$

2.2.6.3 Trocas térmicas

O balanço energético a um edifício deve ser particularizado para a situação de verão e inverno, pois o sentido dos fluxos de calor é diferente nestes períodos. Na estação de aquecimento, as perdas de calor devem ser minimizadas e ocorrem através da envolvente devido a mecanismos condutivos. Devem ainda ser contabilizadas as perdas de calor convectivas devidas a infiltrações e renovações de ar. Os ganhos de calor neste período devem ser potenciados e devem-se à radiação solar que chega aos vãos envidraçados e à carga interna (iluminação, equipamentos e metabolismo dos ocupantes do edifício). Por outro lado, na estação de arrefecimento devem minimizar-se os ganhos solares, tanto pela envolvente opaca como pelos vãos envidraçados e contrariar-se a carga interna (v. Fig. 2.20) [42].

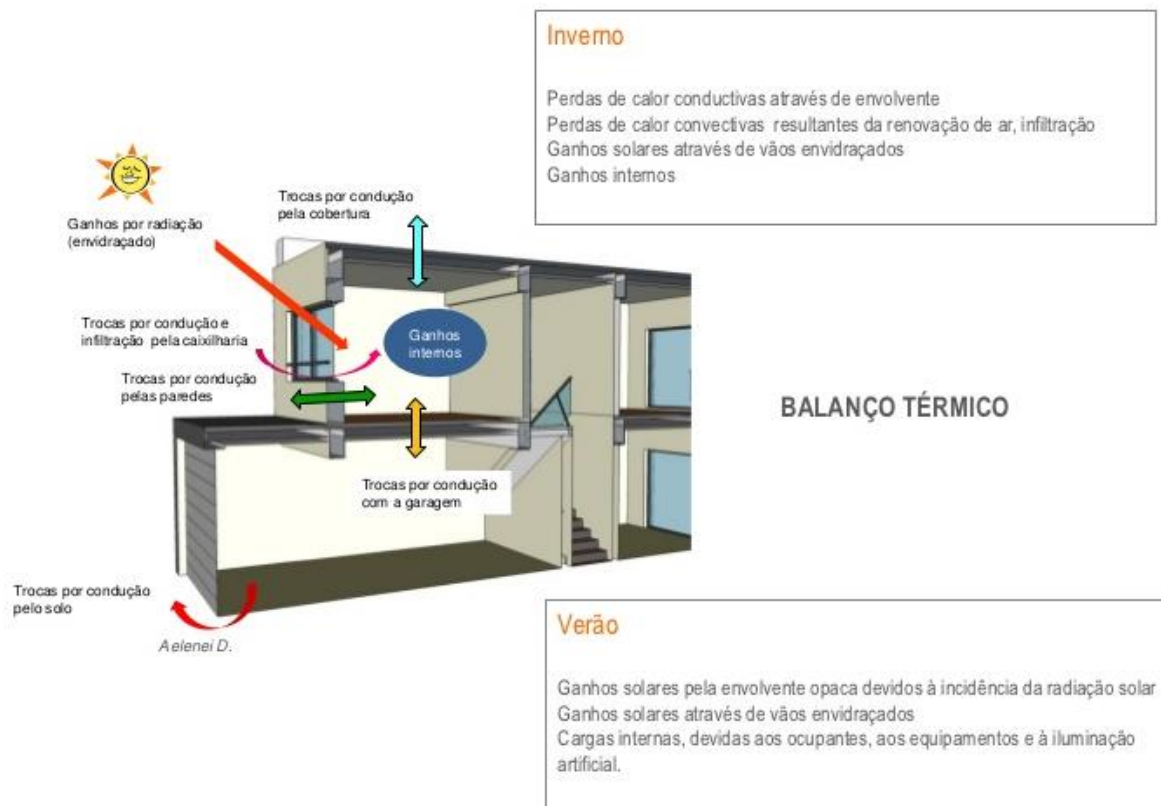


FIGURA 2.20 - TROCAS TÉRMICAS NUM EDIFÍCIO NO PERÍODO DE VERÃO E INVERNO [43]

Tendo em consideração o que foi mencionado anteriormente, poderão ser definidas as necessidades de arrefecimento e de aquecimento, expressas pelas seguintes relações:

$$Q_{nec_arrefecimento} = Q_{cond} + Q_{vent} + Q_{GI} + Q_{Radiação\ solar} \quad (2.14)$$

$$Q_{nec_aquecimento} = Q_{cond} + Q_{vent} - Q_{GI} - Q_{Radiação\ solar} \quad (2.15)$$

onde, Q_{vent} representa as trocas de calor devido à ventilação do espaço; $Q_{Radiação\ Solar}$ representa as trocas térmicas devido à radiação solar e Q_{GI} representa as trocas térmicas devidas a ganhos internos (ocupação + iluminação + equipamentos).

Os ganhos internos devidos a ocupação, iluminação e equipamentos dependem do tipo de edifício e do propósito para que foi construído, enquanto os ganhos solares dependem da orientação do edifício, do período do ano, das condições atmosféricas e do sombreamento. Quanto às perdas de calor estima-se que as mais significativas ocorram através da envolvente em contacto com o exterior (cerca de 30% pelas coberturas e 25% pelas paredes exteriores). Há ainda a ressaltar as perdas devido a orifícios em portas e vãos envidraçados, que representam cerca de 20% da energia total perdida para o meio exterior (v. Fig. 2.21).

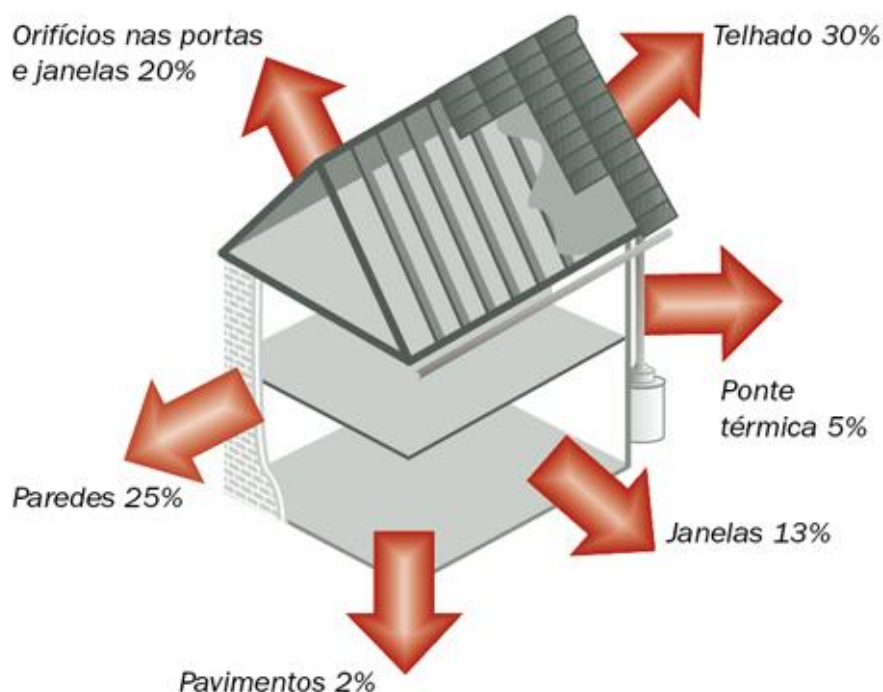


FIGURA 2.21 - ESTIMATIVA DA ENERGIA PERDIDA PARA O MEIO EXTERIOR [44]

A contabilização das trocas de calor (Q) pelos elementos da envolvente do edifício pode ser determinada por:

$$Q_{Cond} = \sum_{i=1}^n U_i A_i (T_i - T_e) \quad (2.16)$$

onde, U_i representa o coeficiente de transferência de calor do elemento i , em $W \, m^{-2} \, K^{-1}$; A_i representa a área do elemento i , em m^2 ; T_i e T_e representam a temperatura interior e exterior, respetivamente, em K.

O coeficiente de transferência de calor de cada elemento da envolvente pode ser determinado ao contabilizar a parcela de convecção (h_i e h_e) e a parcela de condução, partindo da resistência térmica pela relação $R_i = \frac{x}{\lambda}$ e representa a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária do elemento por cada unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ele separa, podendo ser determinado pela expressão:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{h_i} \quad (2.17)$$

ou,

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad (2.18)$$

onde, $\frac{1}{h_e}$ e $\frac{1}{h_i}$ representam as resistências térmicas superficiais exteriores e interiores, respetivamente, em $W \, m^{-2} \, K^{-1}$; R_j representa a resistência térmica da camada j , em $W^{-1} \, m^2 \, K$; R_{si} e R_{se} são as resistências térmicas superficiais interior e exterior, respetivamente, em $W^{-1} \, m^2 \, K$.

A resistência térmica de um material corresponde à dificuldade de transmitir calor e é determinada pelo quociente entre a espessura do material e a sua condutibilidade térmica. Quanto menor a condutibilidade térmica e maior a espessura do material, mais elevada será a resistência térmica. A resistência térmica final de um elemento (R_t) é dada pela soma da resistência térmica do elemento base (R_b) e das resistências térmicas superficiais exterior (R_{se}) e interior (R_{si}) [45]. As resistências térmicas superficiais interior e exterior assumem valores uniformes e tabelados (v. Tabela 2.4).

TABELA 2.4 - RESISTÊNCIAS TÉRMICAS SUPERFICIAIS [46]

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial (W ⁻¹ m ² K);	
	Exterior (R _{se})	Interior (R _{si})
Horizontal ⁽¹⁾	0,04	0,13
Vertical ⁽²⁾		
ascendente	0,04	0,10
descendente	0,04	0,17

⁽¹⁾ Paredes (até ± 30° com a vertical)

⁽²⁾ Coberturas e pavimentos (até ± 60° com a horizontal)

2.2.6.4 A inércia térmica

A inércia térmica dos edifícios é um parâmetro muito importante para o seu balanço térmico, pois é o fenómeno pelo qual o edifício amortece as alterações térmicas exteriores e interiores, o que resulta numa menor variação da temperatura interior e num desfasamento temporal entre as variações de temperatura e a resposta do edifício [18]. A inércia térmica tem origem na capacidade que os materiais possuem de armazenar calor. Desta forma, um edifício de grande inércia tem tendência a armazenar a energia por períodos temporais mais longos e a amenizar os efeitos das variações de temperatura. A classe de inércia térmica do edifício ou fração determina-se de acordo com o valor da massa superficial útil por superfície de área de pavimento e pode ser calculada por:

$$I_t = \frac{\sum_i M_{si} r S_i}{A_p} \quad (2.19)$$

onde, I_t representa a inércia térmica, expressa em kg m⁻², M_{si} é a massa superficial útil do elemento i , em kg m⁻², r é o fator de redução da massa superficial útil, S_i é a área de superfície interior do elemento i , em m², e A_p é a área útil de pavimento, em m².

De acordo com o RCCTE a inércia térmica (I_t) do edifício considera-se:

- **fraca** se $I_t < 150$ kg m⁻²
- **média** se $150 \text{ kg m}^{-2} \leq I_t \leq 400 \text{ kg m}^{-2}$
- **forte** se $I_t > 400 \text{ kg m}^{-2}$

A otimização da inércia térmica tem sido uma medida implementada na região do clima mediterrânico, ao longo dos séculos. O efeito conferido pela inércia térmica é especialmente

relevante em locais sujeitos a amplitudes térmicas consideráveis em curtos espaços de tempo. Os materiais pesados e maciços conferem inércia térmica aos edifícios e, quando bem aplicados, contribuem para uma maior estabilidade térmica dos espaços interiores. Estes materiais interagem lentamente com as temperaturas do meio exterior e armazenam as respetivas temperaturas médias, uma vez que as temperaturas de pico não se mantêm durante tempo suficiente para serem acumuladas. Uma vez armazenada a temperatura do meio, a interação de um elemento de construção maciço com o clima interior é positiva, ao irradiar continuamente a temperatura armazenada para os espaços interiores. Atualmente, a solução passa pela construção de edifícios habitacionais com estruturas pesadas (paredes, pavimentos e coberturas) e bem isoladas termicamente. Para que o contributo da inércia térmica seja otimizado, é importante evitar que os materiais pesados (como o betão, os tijolos ou os rebocos) sejam revestidos com outros materiais leves (como alcatifas ou madeiras) que funcionam como isolantes e interrompem o intercâmbio térmico, que se pretende manter [47].

Por outro lado, a cor das superfícies condiciona a capacidade de absorção térmica e a reflexão da luz. A cor com a qual é revestida a superfície influencia o seu comportamento, na medida em que as cores claras refletem melhor a radiação (por absorverem menos) e são ideais para climas mais quentes, enquanto as cores mais escuras absorvem mais radiação, o que aumenta a temperatura nos espaços interiores [47].

2.2.6.5 As pontes térmicas

Geralmente, o fluxo de calor atravessa a superfície perpendicularmente, através do fenómeno de condução. Porém, o fluxo de calor segue a trajetória onde ocorre também menor dissipação de trabalho e por vezes a transmissão de calor não decorre perpendicularmente à superfície. As pontes térmicas representam locais ou pontos da construção onde ocorrem dissipações de calor, devidas ao fenómeno explicado anteriormente e podem ocorrer em:

- interfaces entre as vigas de betão e as paredes de alvenaria;
- envidraçados inseridos numa parede;
- cantos ou tubagens de água quente.

O tratamento das pontes térmicas é executado a partir do aumento da resistência térmica da zona onde ocorre, geralmente através da colocação de isolamento térmico [48]. As perdas térmicas são contabilizadas individualmente através de coeficientes de transmissão térmica lineares, Ψ . Estes coeficientes são listados para as soluções comuns no RCCTE e nos casos não listados deve ser assumido o valor de $\Psi = 0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. As perdas térmicas resultantes de pontes térmicas lineares podem ser obtidas pelo produto entre o coeficiente e o comprimento da ponte térmica, medido pelo interior [38].

2.2.6.6 O efeito da ventilação/ infiltração de ar

As perdas térmicas globais de um edifício podem ocorrer de duas formas distintas, seja pela transmissão de calor através de superfícies em contacto com o exterior, seja pelas trocas de ar (devidas à renovação ou infiltração de ar) [49]. As trocas de ar entre o edifício e o exterior podem dever-se a mecanismos de ventilação (entrada propositada de ar no edifício, através de janelas ou grelhas) ou de infiltração (entrada não intencional de ar através de fendas ou aberturas) [50]. A ventilação é um fator importante no desempenho energético de um edifício pois pode ser responsável por consumos elevados de energia. Devem projetar-se sistemas de ventilação (naturais ou mecânicos) capazes de suprir as necessidades de qualidade de ar interior e que permitam prevenir riscos de condensações indesejadas. Por outro lado, devem ser tomadas medidas para que as taxas de infiltração de ar sejam minimizadas através, por exemplo, do aumento da estanquicidade dos elementos da envolvente [18].

2.2.7 Isolamento térmico

2.2.7.1 Enquadramento

O desenvolvimento de novas técnicas construtivas cuja tendência é o emprego de betão armado resultou na redução da espessura das paredes. Consequentemente, a permeabilidade ao calor destes elementos foi aumentada, originando perdas térmicas consideráveis durante os meses frios, compensadas com instalações de aquecimento e gastos excessivos de energia [51]. Para que os efeitos da maior permeabilidade térmica na construção sejam minimizados, e para satisfazer a crescente exigência de conforto, é necessário determinar o fluxo calorífico que atravessa a envolvente e reduzi-lo através do aumento da resistência térmica dos elementos construtivos com a colocação de isolamento. Os materiais isolantes, atualmente, são comercializados a preços muito competitivos e não encarecem significativamente a obra [51] e a magnitude da economia de energia em resultado da utilização de isolamento térmico varia de acordo com o tipo de construção, as condições climáticas onde o edifício se localiza e com o tipo, espessura e local da incorporação do isolante [52].

A diferença ao nível do conforto entre um edifício isolado e outro sem isolamento é significativa. No inverno, um local não isolado não é confortável termicamente, pois mesmo que se gaste uma grande quantidade de energia para combater as perdas de calor, as paredes desses locais estarão sempre frias originando perdas de radiação do corpo humano e provocando sensações de desconforto. Esta situação pode resultar em perdas de rendimento devido ao mal-estar, que variam entre os 25% e 30% do rendimento expectável. Durante o verão, um local sem isolamento pode aquecer excessivamente devido à ausência de inércia térmica e à transmissão de calor através das paredes e coberturas (v. Fig. 2.22) [51].

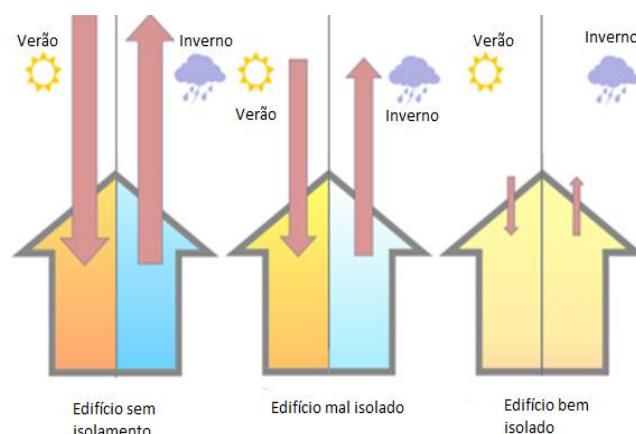


FIGURA 2.22 – EFEITO DO ISOLAMENTO TÉRMICO NAS TROCAS DE CALOR DE UM EDIFÍCIO [53]

De forma geral, verifica-se que a nível europeu, a utilização de isolamento aumentou, tanto em termos do número de edifícios isolados como na espessura mínima de isolamento exigida pelos regulamentos nacionais [54]. A Figura 2.23 mostra o aumento da espessura de isolamento térmico em paredes exteriores, exigida pelos regulamentos nacionais de diferentes países europeus, no período entre 1982 e 1999. A figura revela também a disparidade entre as espessuras exigidas nos países nórdicos, com situações climáticas mais rigorosas (Finlândia, Dinamarca e Noruega) e nos países situados a Sul da Europa, com climas mais amenos (Itália, Bélgica e Grécia).

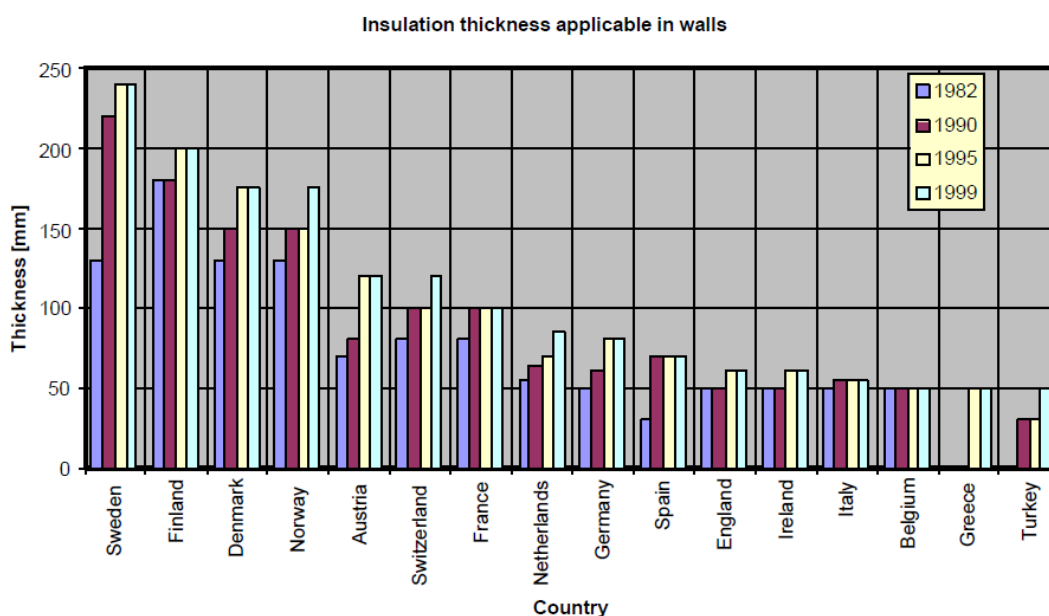


FIGURA 2.23 - EVOLUÇÃO DA ESPESSURA DE ISOLAMENTO EM FACHADAS NOS PAÍSES EUROPEUS [54]

Em Portugal, assistiu-se a uma viragem significativa na mentalidade construtiva após a década de 1971-1980, quando o número de edifícios novos com isolamento térmico ultrapassou o número de edifícios não isolados (v. Fig. 2.24).

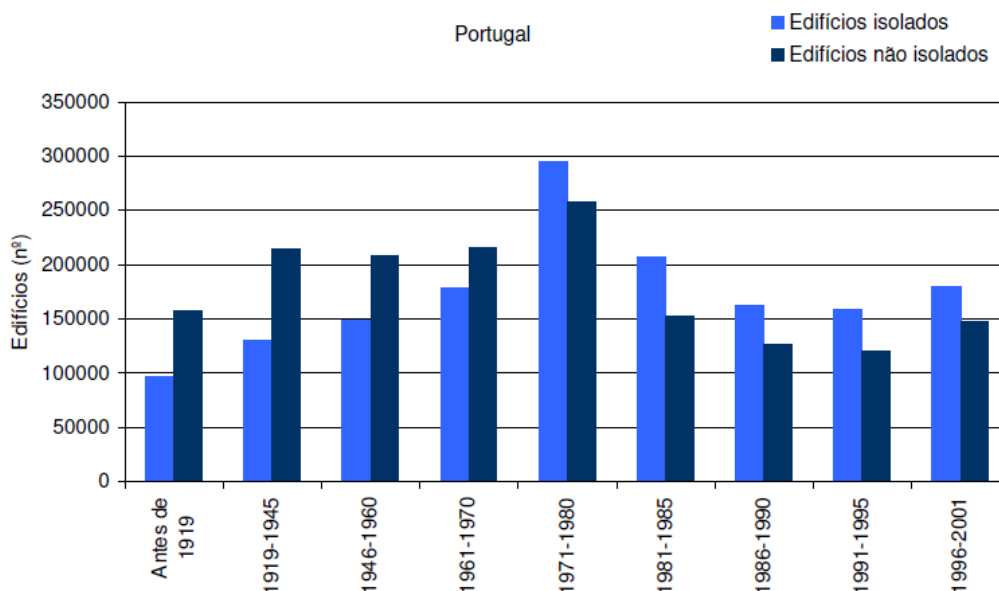


FIGURA 2.24 - DISTRIBUIÇÃO DE EDIFÍCIOS COM E SEM ISOLAMENTO TÉRMICO, POR ÉPOCA CONSTRUTIVA [8]

Em 2001, o número de edifícios isolados na região Norte e Centro era superior ao número de edifícios não isolados (v. Fig. 2.25). Este resultado deve-se, em parte, ao facto de as condições climáticas (especialmente no Inverno) serem mais rigorosas, o que potencia a necessidade de aumentar a resistência térmica da envolvente exterior dos edifícios.

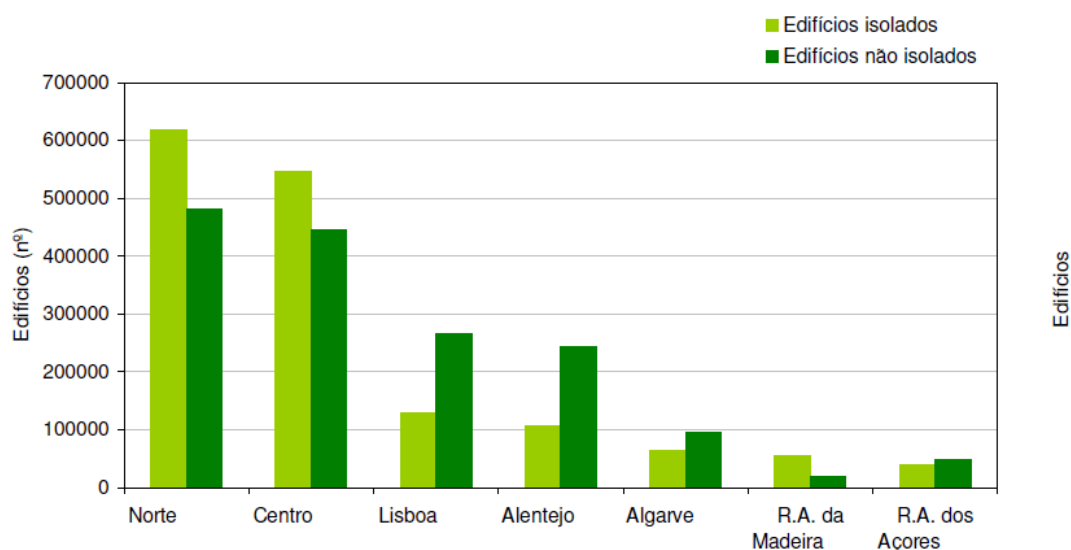


FIGURA 2.25 - EDIFÍCIOS COM E SEM ISOLAMENTO EM PORTUGAL E POR NUTS II, EM 2001 [8]

2.2.7.2 O efeito do isolamento térmico

O isolamento térmico tem como principal função o aumento da resistência térmica da envolvente do edifício, de forma a reduzir as trocas de calor entre o meio interior e o exterior. A eficácia de um isolante é avaliada em termos da sua resistência térmica (R_t), assim, quanto maior o valor de R_t , maior a eficácia do isolante. Este valor depende do tipo de isolamento, da sua espessura e da sua densidade [40]. O isolante é na maior parte dos casos constituído por um material que contém um gás, enclausurado em células ou num entrançado de fibras. Um material considera-se isolante quando o seu coeficiente de condutibilidade térmica é inferior a $0,12 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e, quanto menor for este coeficiente, maior será a resistência que o corpo opõe à passagem de calor [51].

O isolamento é a solução mais efetiva na redução de trocas térmicas, pois um investimento inicial mínimo permite rentabilizar a poupança energética ao longo de toda a vida útil do edifício. Se o isolamento for incorporado na estrutura do edifício, conseguir-se-á que a energia introduzida no mesmo não se perca e aumentar-se-á a sua performance energética [45]. Um isolamento térmico eficaz traz vantagens importantes em relação ao aquecimento e arrefecimento de espaços, já que a diminuição do fluxo de calor para o exterior permite uma redução no funcionamento de equipamentos mecânicos de climatização. Em relação às condições de trabalho e sistemas de produção, um bom isolamento permite a climatização de espaços, facilitando a manutenção de temperaturas amenas no inverno e frescas no verão, suprimindo os efeitos das mudanças bruscas de temperatura. Outra das vantagens do isolamento é que, ao manter as superfícies de paredes e tetos a temperaturas próximas do ambiente e superiores ao valor do ponto de orvalho são evitadas condensações indesejadas [51]. Por outro lado, pode ser alcançada uma economia de energia significativa através da utilização de isolamento térmico, não só permitindo reduzir os períodos de funcionamento dos equipamentos de climatização, como também reduzindo a potência necessária do equipamento. Finalmente, podem destacar-se as vantagens ao nível do ruído, uma vez que a incorporação de isolamento térmico pode reduzir o ruído perturbador dos sistemas de climatização, aumentando o conforto acústico [12].

2.2.7.3 Isolantes mais comuns

O mercado europeu de materiais de isolamento é caracterizado pela predominância de dois grupos de produtos: os materiais fibrosos inorgânicos, como a lã de vidro e lã de rocha, que correspondem a 60% do mercado e os materiais espumosos orgânicos (como o poliestireno e em menor proporção, o poliuretano), responsáveis por 27% do mercado. Todos eles apresentam desempenho semelhante em termos de capacidades de isolamento, mas características muito distintas [54].

Lã mineral

A lã mineral abrange a lã ou fibra de vidro e a lã de rocha, é normalmente produzida como esteiras e pranchas, mas ocasionalmente também pode ser produzida como material de enchimento. As placas de lã mineral de grande densidade são geralmente aplicadas em estruturas com cavidades, como pisos ou telhados. A lã de vidro é produzida a partir de vidro de borossilicato a uma temperatura que ronda os 1400 °C. Já a lã de rocha é produzida a partir da fusão de rochas a 1500 °C, onde a massa aquecida é arremessada, criando fibras. A condutibilidade térmica da lã mineral varia com a temperatura, teor de humidade e densidade [55].

Poliestireno

O poliestireno é um polímero aromático, sintetizado a partir do monómero de estireno e pode apresentar-se na sua forma sólida ou em espuma. No campo dos isolantes térmicos destaca-se o poliestireno expandido e o poliestireno extrudido pelas características que adquirem após tratamento. O poliestireno expandido ou EPS (do inglês *expanded polystyrene*) é produzido a partir de pequenas esferas de poliestireno contendo um agente de expansão, que expandem por aquecimento com vapor de água. Os produtos de EPS podem ser perfurados, cortados e ajustados no local da construção, sem qualquer perda das características térmicas. O poliestireno extrudido ou XPS (do inglês *extruded polystyrene*) é produzido a partir de poliestireno derretido por adição de um gás de expansão, onde a massa de poliestireno extrudido é expandida através de um bocal com libertação de pressão. O material é produzido em comprimentos contínuos, cortados depois de arrefecidos [55].

Celulose

A celulose é um polissacarídeo conseguido a partir de papel reciclado ou de fibras de madeira, aos quais se adiciona ácido bórico e boratos de sódio que melhoram as propriedades do produto. O processo de produção confere ao material uma consistência semelhante à da lã. O isolamento com celulose é utilizado geralmente no enchimento de cavidades e espaços, mas existem também tapetes e placas compostos por este isolante [55].

Cortiça

A cortiça é um material natural que pode ser comercializada tanto como um material de enchimento ou na forma de placas [55]. Pela sua menor disponibilidade e custo elevado, este não é um material utilizado com frequência.

Poliuretano (PUR)

O poliuretano é formado através da reação entre isocianatos e álcoois contendo múltiplos grupos hidroxila. Durante o processo de expansão, os poros são preenchidos com uma expansão de gases. O isolante é apresentado na forma de placas ou de espuma de expansão para vedar janelas e portas ou preencher cavidades. A condutibilidade térmica do poliuretano varia com a temperatura, teor de humidade e densidade e é consideravelmente inferior à do poliestireno ou das lãs minerais. Deve notar-se que em caso de contacto com o fogo, o poliuretano liberta compostos de cianeto e isocianatos, bastante tóxicos [55].

2.2.7.4 Propriedades dos isolantes térmicos

Vários parâmetros devem ser considerados quando se seleciona um isolante térmico, incluindo a sua durabilidade, custo, resistência à compressão, absorção de vapor de água, resistência ao fogo, facilidade de aplicação e condutibilidade térmica. No entanto, a resistência térmica dos materiais de isolamento é a propriedade mais importante quando se considera o desempenho térmico e a conservação de energia [12].

Condutibilidade térmica

Os isolamentos térmicos funcionam reduzindo a transmitância térmica através da envolvente do edifício, aumentando-se a resistência térmica tanto quanto possível [56]. A principal qualidade que deve ter o material isolante é a de realmente isolar, isto é, ter um coeficiente de condutibilidade térmica tão baixo quanto possível e conservá-lo através do tempo, uma vez que a perda de calor através de um elemento será proporcional a λ [51]. A Figura 2.26 mostra a diferença entre os coeficientes de condutibilidade térmica máximos e mínimos dos diferentes materiais utilizados em construção, incluindo os materiais isolantes.

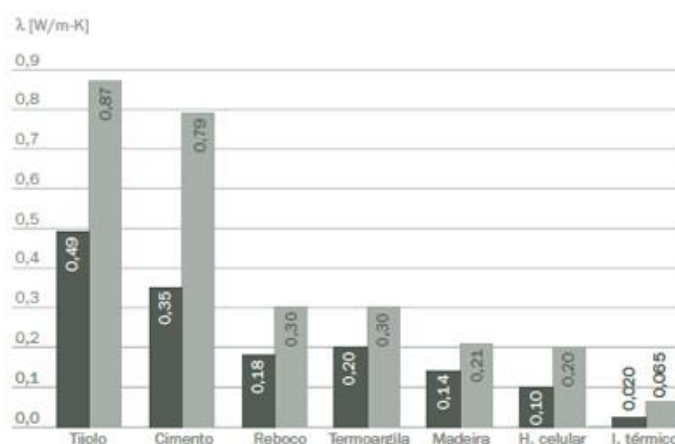


FIGURA 2.26 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE λ DE DIVERSOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO [56]

Resistência à humidade

Embora a água não seja desejada na construção a sua presença é inevitável, seja na sua forma líquida (através de infiltrações de água da chuva, condensações, capilaridade ascendente desde o terreno, a própria água utilizada na construção do edifício, etc.) seja na sua forma sólida, o que a torna mais perigosa. A absorção deste elemento pelos materiais de construção induz um aumento de condutibilidade térmica, o que também acontece no caso dos materiais isolantes [56]. A cortiça, a lã mineral e a celulose são os isolantes que, devido às suas características próprias, mais sofrem com o efeito da humidade e a sua incorporação pelo exterior não é recomendada. Para que um isolante permeável conserve as suas propriedades deverá ser protegido da humidade através de um painel pára-vapor que impede que a água na forma de vapor atravesse o material [51].

Resistência ao fogo

Neste domínio os isolantes têm comportamentos diferentes pois, se uns são completamente incombustíveis, outros ardem e propagam o fogo, podendo mesmo libertar gases tóxicos. Deve ter-se em consideração não o material por si só, mas também a sua aplicação, posicionamento, os materiais que o suportam ou protegem e os tratamentos a que foi submetido [51].

Outras propriedades de interesse

Pode ainda ser importante conhecer a temperatura máxima suportada pelo material (um isolante deve ser fisicamente estável numa gama de temperaturas entre -25 °C e 20 °C) e a sua resistência a agentes biológicos como insetos ou fungos [51]. Apesar de as propriedades térmicas dos isolantes não terem melhorado significativamente na última década, uma série de outras características como a reação ao fogo e à humidade ou as propriedades mecânicas têm sido melhoradas [54].

2.2.7.5 Espessura ótima dos isolantes térmicos

A definição da espessura de isolamento a aplicar na envolvente é necessária, durante a fase de projeto. Comparando a diminuição das necessidades de climatização com o aumento dos encargos económicos devido ao isolamento, obtém-se a espessura ótima de isolamento a incorporar no edifício (v. Fig. 2.27).

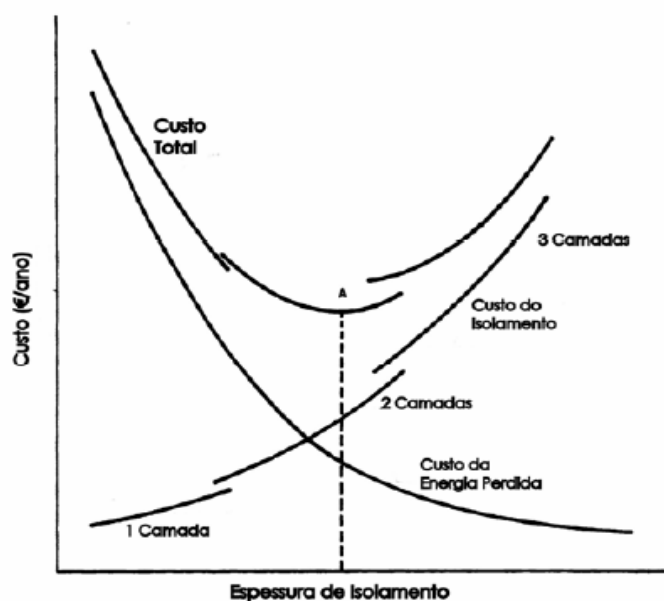


FIGURA 2.27 - DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA ÓTIMA DE ISOLAMENTO [18]

Se a um determinado elemento da envolvente com determinado coeficiente U , se adicionar um isolante com um determinado coeficiente λ_1 , de determinada espessura, obtém-se um novo elemento composto, cujo respetivo coeficiente U_1 poderá ser determinado pela expressão:

$$\frac{1}{U_1} = \frac{1}{U} + \frac{e_1}{\lambda_1} \quad (2.20)$$

Conclui-se assim que o isolamento melhora (ou seja, U diminui) quando a condutibilidade térmica diminui e quando a espessura aumenta. Ao conhecer o coeficiente de transmissão de calor do isolante sabe-se, do ponto de vista prático, o nível de isolamento satisfatório para a construção em causa e a espessura de isolante a colocar [49].

2.2.7.6 Local de colocação do isolamento

O local de colocação do isolamento térmico não é crítico do ponto de vista da resistência térmica pois qualquer componente construtivo terá a mesma resistência térmica para o mesmo material e espessura, independentemente do local da colocação. No entanto, existem outras considerações práticas para a colocação de isolamento [12].

Colocação de isolamento pelo interior

O significado arquitetónico das fachadas exteriores de edifícios históricos impede a utilização de isolamento exterior. Nestes casos, o isolamento interno é considerado a alternativa mais viável, embora possa também ser invasivo. A introdução de novos materiais, substituindo revestimentos com valor histórico pode distorcer as proporções dos espaços e, mesmo o isolamento interno deve ser aplicado apenas em algumas situações. O isolamento interior deve ainda ter em conta o equilíbrio entre calor, ar e humidade que afetam a integridade do edifício [57].

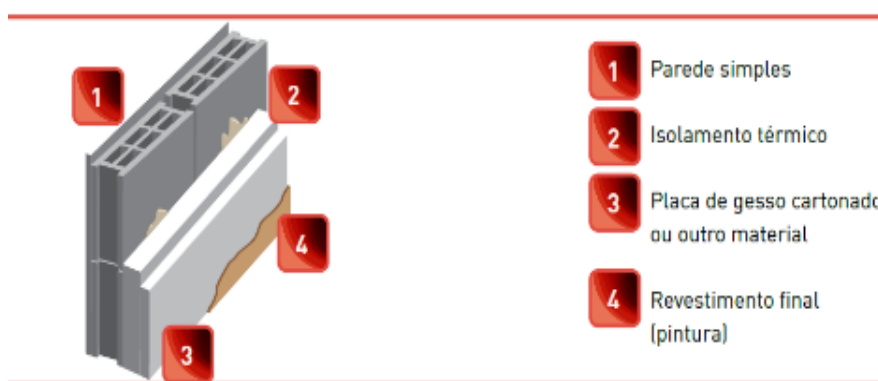


FIGURA 2.28 – EXEMPLO DA COLOCAÇÃO DE ISOLAMENTO NO INTERIOR DA PAREDE [45]

A colocação de isolamento pelo interior não elimina a totalidade das pontes térmicas e não contribui significativamente para a resolução dos problemas relacionados com a entrada de humidade e condensações no elemento construtivo (v. Fig. 2.29). Porém, embora a colocação de isolamento pelo interior não seja a mais desejável, contribui para o aumento da resistência térmica do elemento construtivo e em algumas situações pode ser a única opção viável.

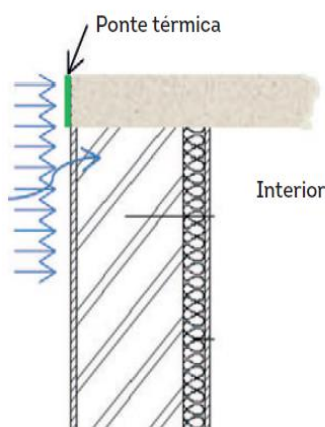


FIGURA 2.29 - EFEITOS DA COLOCAÇÃO DE ISOLAMENTO PELO INTERIOR (ADAPTADA DE [58])

Colocação de isolamento pelo exterior

A colocação de isolamento pelo exterior permite armazenar o excesso de energia solar e os ganhos internos. No entanto, a sua durabilidade pode ser comprometida devido à exposição ao meio externo [57]. Geralmente, os sistemas de isolamento pelo exterior são constituídos por uma camada de isolamento colocada sobre um suporte e um paramento exterior para garantir a sua proteção (v. Fig. 2.30). Estes sistemas podem ser divididos em três grupos:

- fachadas ventiladas, que consistem em revestimentos descontínuos fixados ao suporte através de uma estrutura intermédia;
- “*vêture*”, constituído por componentes prefabricados (isolamento e paramento) fixados diretamente no suporte;
- ETICS (do inglês *External Thermal Insulation Composite Systems with rendering*), que consistem em rebocos armados aplicados diretamente sobre o isolamento prefabricado assente sobre um suporte [31].



FIGURA 2.30 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO NO PANO EXTERIOR DA PAREDE [45]

A colocação de isolamento pelo exterior permite:

- reduzir as pontes térmicas, o que resulta numa espessura de isolamento mais reduzida para que se atinja o mesmo coeficiente de transmissão térmica global da envolvente;
- diminuir o risco de condensações;
- aumentar a inércia térmica do edifício, pois a maior parte da massa das paredes encontra-se pelo interior da camada de isolamento;
- aumentar a proteção das paredes face à exposição aos agentes atmosféricos;
- diminuir o gradiente de temperaturas a que são expostas as camadas interiores das paredes [31].

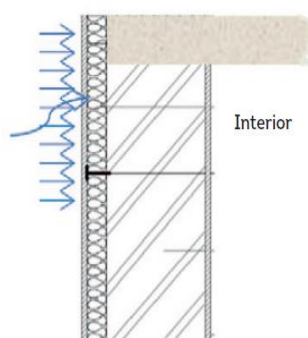


FIGURA 2.31 - EFEITOS DA COLOCAÇÃO DE ISOLAMENTO PELO EXTERIOR (ADAPTADO DE [58])

A Figura 2.31 mostra o efeito da colocação de isolamento pelo exterior, protegendo as zonas onde ocorrem as pontes térmicas e criando uma barreira protetora que impede a entrada de humidade no elemento construtivo, o que se traduz numa diminuição da probabilidade de ocorrência de condensações.

Colocação de isolamento na caixa-de-ar

O isolamento pode ainda ser colocado no interior da caixa-de-ar de uma parede dupla, permitindo uma distribuição uniforme do isolamento no elemento construtivo (v. Fig. 2.32) [57].



FIGURA 2.32 - EXEMPLO DA APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO NA CAIXA-DE-AR DE UMA PAREDE DUPLA [45]

Da mesma forma que a colocação de isolamento pelo interior não permite minimizar as perdas através de pontes térmicas, também a opção da colocação de isolamento no interior da caixa-de-ar não é eficaz neste sentido. Por outro lado, como cerca de metade da massa do elemento construtivo se situa pelo exterior da camada de isolamento, esta opção não permite um combate completamente eficaz à entrada de humidade e à formação de condensação (v. Fig. 2.33).

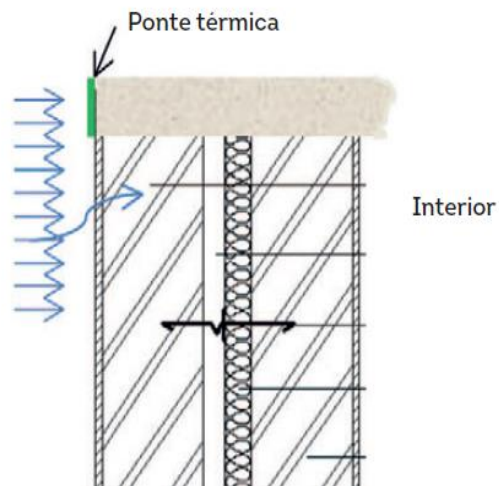


FIGURA 2.33 - EFEITO DA COLOCAÇÃO DE ISOLAMENTO NA CAIXA-DE-AR (ADAPTADO DE [58])

Capítulo III – Metodologia

Para o cumprimento do objetivo proposto para o presente trabalho foram definidas diferentes situações partindo-se de um *layout* comum de referência, ao qual foram aplicadas diferentes soluções construtivas. Para as simulações recorreu-se ao programa de simulação térmica dinâmica *EnergyPlus*, através da sua interface gráfica *DesignBuilder*.

3.1 Programas de simulação

O *EnergyPlus*

A obrigatoriedade da realização de simulações dinâmicas detalhadas para os grandes edifícios de serviços impostas pelo RSECE, levou ao desenvolvimento de alguns programas de simulação acreditados pela ASHRAE, entre os quais o *EnergyPlus* [59]. Este software pode ser utilizado em qualquer tipo de edifício e é um dos mais divulgados, tanto no meio académico como no meio empresarial. O programa foi oficialmente apresentado em 1996 e resultou da combinação de atributos de dois dos melhores programas existentes, o *DOE-2* e o *BLAST* (*B*uilding *L*oad *A*nalysis and *S*ystem *T*hermodynamics). O *EnergyPlus* permite a simulação de cargas térmicas e consumos energéticos numa base horária, multi-zona, permitindo ao utilizador desenvolver ferramentas de apoio, o que torna este programa interessante do ponto de vista científico [60].

O *DesignBuilder*

O *DesignBuilder* é uma interface gráfica do *EnergyPlus* e a sua utilização tem sido cada vez mais comum entre projetistas e peritos. Este software permite desenhar o modelo do edifício, caracterizá-lo e efetuar simulações com a finalidade de determinar consumos energéticos e potências de climatização. O software permite a simulação energética dinâmica de edifícios, independentemente da sua complexidade, caracterizando-se pela facilidade de utilização [59]. No presente trabalho foi utilizada a versão 4.7.0.027.

3.2 Caracterização do caso de estudo

As simulações requeridas para a realização do presente trabalho partiram de um *layout* comum pertencente a uma moradia unifamiliar situada na localidade de Barrocal (à latitude de 39°55'50.0"N e à longitude de 8°36'04.0"W), município de Pombal, distrito de Leiria, pertencente à zona climática I₂ V₂. A habitação foi construída em 2003, tem uma área útil de pavimento de 176 m² e um pé-direito de 2,70 m, situa-se em zona urbana e está rodeada por construções da mesma natureza. Trata-se de um edifício com apenas um andar habitável, sendo que possui um

sótão utilizado para arrumos, considerado não habitável. A ligação entre ambos os pisos é efetuada por um vão de escadas, cujo efeito foi desprezado na realização das simulações. No Anexo IV podem encontrar-se os alçados da habitação e a Figura 3.1 mostra a vista frontal da habitação estudada.



FIGURA 3.1 - VISTA FRONTAL DA MORADIA (FONTE: GOOGLE MAPS)

3.3 Definição de cenários

Para que fossem avaliadas várias situações foram criados três cenários. O cenário A diz respeito à simulação da solução construtiva da habitação de referência. Este cenário foi subdividido em três situações:

- o sub-cenário A.1 diz respeito à solução construtiva de referência, tal como existe na realidade;
- no sub-cenário A.2 pretendeu avaliar-se o efeito da duplicação da espessura do isolamento;
- o sub-cenário A.3 pretendeu demonstrar o efeito da incorporação de envidraçados de baixa emissividade no conforto térmico global da habitação.

O cenário B diz respeito à simulação das soluções construtivas representativas das décadas de 1940 e 1970. Finalmente, no cenário C pretendeu-se avaliar a importância da escolha do local de colocação do isolamento. Para a simulação deste cenário, selecionou-se a solução construtiva mais antiga (1940), por ser aquela em que se esperaria um pior desempenho térmico.

Pode ainda referir-se que a situação A.1 e os cenários B e C foram simulados para diferentes zonas climáticas do país, por se considerar relevante averiguar a resposta do sistema construtivo à situação climática externa. A Tabela 3.1 sintetiza os cenários definidos para as simulações realizadas.

TABELA 3.1 - DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

Cenário	Descrição
Cenário A	A.1) Simulação da solução construtiva de referência
	A.2) Simulação da solução construtiva de referência, com o dobro do isolamento
	A.3) Simulação da solução construtiva de referência, substituindo os vãos envidraçados por vidro de baixa emissividade
Cenário B	B.1) Simulação da solução construtiva da década de 1940
	B.2) Simulação da solução construtiva da década de 1970
Cenário C	Simulação da colocação de isolamento na solução construtiva da década de 1940, variando a sua colocação na face exterior e interior das paredes

3.4 Parâmetros de simulação

O software necessita de determinadas variáveis de entrada que possibilitam a simulação energética dinâmica do edifício que se pretende estudar. Os parâmetros de simulação a fornecer ao programa dizem respeito à localização do edifício a simular e aos dados climáticos da região; à geometria e orientação do edifício; às tipologias construtivas e materiais empregues na envolvente opaca e envidraçada e aos ganhos internos (definição de perfis de ocupação, atividades desempenhadas pelos ocupantes, número de ocupantes, equipamentos, iluminação e sistemas de climatização).

3.4.1 Localização e clima

Um dos parâmetros de entrada a fornecer ao *software* é a localização do edifício e os dados climáticos característicos dessa localização. O programa possui ficheiros climáticos próprios para diferentes países e para diferentes zonas dentro de cada um desses países (v. Fig. 3.2).

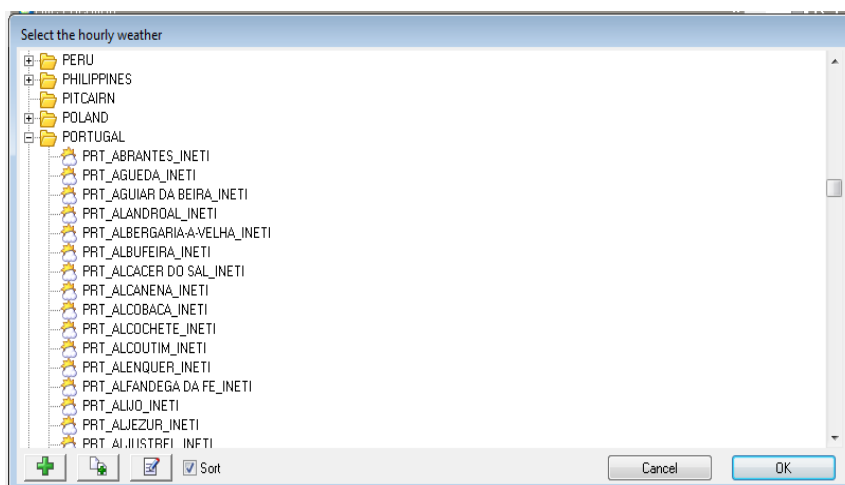


FIGURA 3.2 - SELEÇÃO DE FICHEIROS CLIMÁTICOS

O programa permite também a introdução de outros ficheiros climáticos. Para isso e uma vez que se considerou relevante realizar as simulações para as diferentes zonas climáticas do país, recorreu-se a dados disponibilizados pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia através da aplicação «CLIMAS-SCE». Esta aplicação permite selecionar o município pretendido para a simulação e fornece todos os dados climáticos importantes para a localização selecionada, permitindo também exportar o ficheiro climático em formato compatível com o *software*.

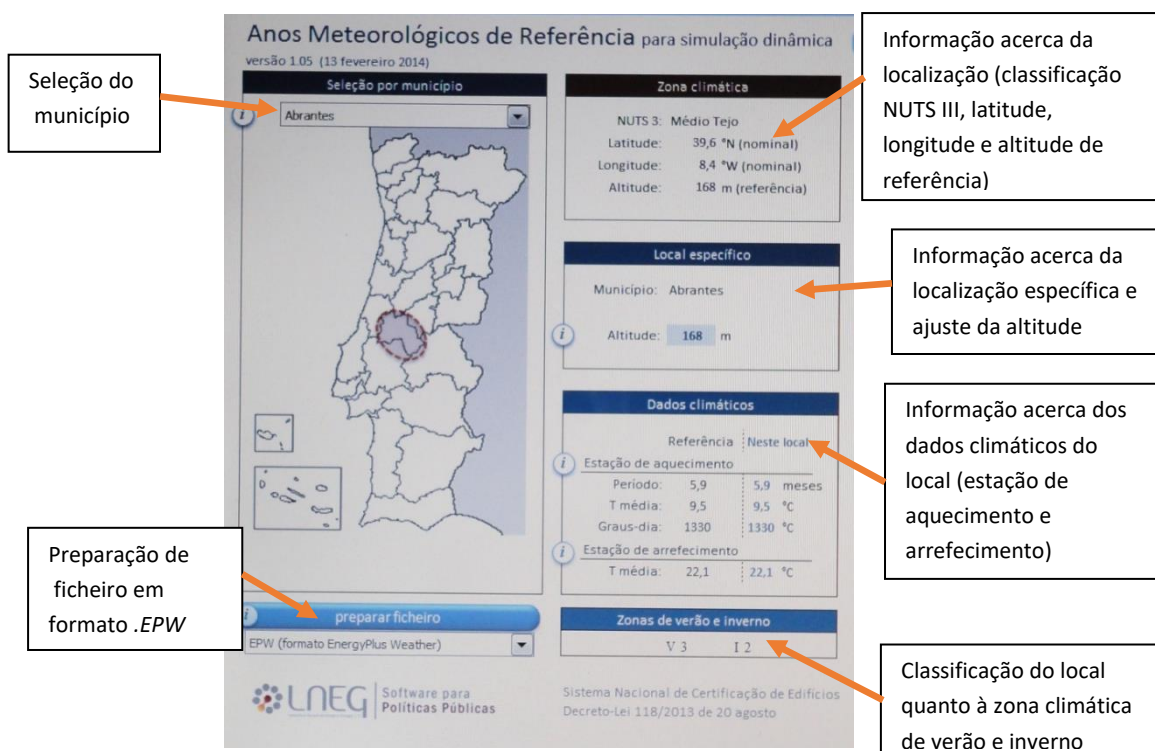


FIGURA 3.3 - APLICAÇÃO «CLIMAS-SCE»

Ao seleccionar cada um dos municípios disponíveis na aplicação verificou-se a não existência de algumas zonas climáticas. Segundo Ricardo Aguiar, um dos criadores da aplicação, a não existência de algumas zonas climáticas na aplicação ou eventuais discrepâncias entre esta e a classificação definida pela legislação deve-se ao facto de na aplicação, o limiar de conforto ter passado de 20 °C para 18 °C e ao facto de no caso do verão se utilizar como parâmetro principal a temperatura média exterior (em detrimento da temperatura exterior de projeto no verão) [61]. Na Tabela 3.2 encontram-se listadas as características climáticas importantes para as cinco zonas climáticas encontradas na aplicação.

TABELA 3.2 - DADOS CLIMÁTICOS

Zona climática de Inverno	Zona climática de Verão	Município	NUTS III	Latitude (Nominal)	Longitude (Nominal)	Altitude de Referência (m)	Estação de Aquecimento		GD	Estação de Arrefecimento
							Período (meses)	Temperatura média (°C)		Temperatura média (°C)
	V₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I₁	V₂	Porto	Grande Porto	41,3 °N	8,6 °W	145	6,2	9,9	1250	20,9
	V₃	Albufeira	Algarve	37,3 °N	8,0 °W	145	4,8	11,3	987	23,1
	V₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I₂	V₂	Pombal	Pinhal Litoral	39,8 °N	8,8 °W	126	6,6	9,6	1323	20,1
	V₃	Abrantes	Médio Tejo	39,6 °N	8,4 °W	168	5,9	9,5	1330	22,1
	V₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I₃	V₂	Bragança	Alto Trás-os-Montes	41,6 °N	7,1 °W	680	7,3	5,5	2015	21,5
	V₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.4.2 Geometria do edifício

A habitação de referência é constituída por uma cozinha tendo como anexos uma marquise e uma despensa; por uma sala de estar; por três quartos; por duas casas de banho, uma das quais privativa, e por largos acessos (v. Anexo V e Anexo VI).

3.4.3 Ganhos internos

Atividade metabólica e perfil de ocupação

O aspeto do separador relativo à atividade metabólica e perfil de ocupação apresenta-se na Figura 3.4.

Section	Parameter	Value
Template	Sector	Residential spaces
	Zone multiplier	1
	Include zone in thermal calculations	<input checked="" type="checkbox"/>
Floor Areas and Volumes	Occupied floor area (m2)	171.4
	Occupied volume (m3)	600.0
	Unoccupied floor area (m2)	199.3
	Unoccupied volume (m3)	124.1
Occupancy	Density (people/m2)	0.0155
	Schedule	Dwell_DomCirculation_Occ
Metabolic	Activity	Work involving walking etc
	Factor (Men=1.00, Women=0.85, Children=0.75)	0.90
	CO2 generation rate (m3/s-W)	0.0000000382
	Clothing	
Generic Contaminant Generation	Winter clothing (clo)	1.00
	Summer clothing (clo)	0.50
Holidays	Generic contaminant generation/removal	<input type="checkbox"/>
	Holidays	<input checked="" type="checkbox"/>
	Holidays per year	10
	Holiday schedule	Typical UK

FIGURA 3.4 - SEPARADOR *ACTIVITY TEMPLATE* DO *DESIGNBUILDER*

No menu direcionado ao efeito da ocupação, ao selecionar a opção *Template*, o programa sugere diferentes perfis de ocupação para diversos espaços, entre os quais espaços residenciais. Dentro deste submenu podem ser selecionadas diferentes opções de acordo com a atividade exercida em cada um dos espaços (v. Fig.3.5).

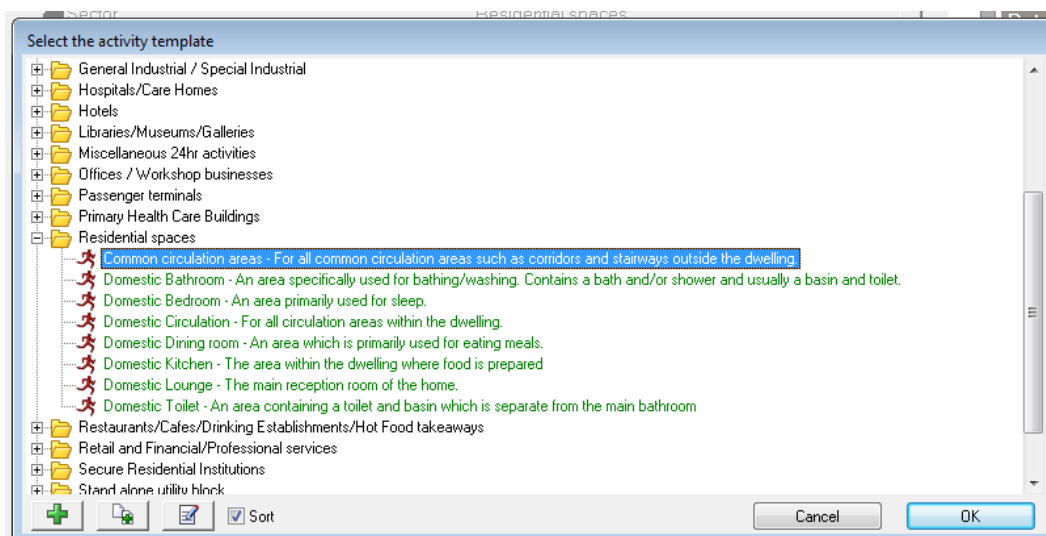


FIGURA 3.5 - SELEÇÃO DA ATIVIDADE EXERCIDA CONSOANTE OS ESPAÇOS

Na Tabela 3.3 descreve-se a atividade metabólica pressuposta para cada área e o respetivo perfil de ocupação.

TABELA 3.3 - ATIVIDADE METABÓLICA E PERFIS DE OCUPAÇÃO

Espaço	Descrição	Atividade [W]	Período de utilização
Cozinha	Atividades relacionadas com a confeção de alimentos	180	Todos os dias da semana, das 7 h às 8:30 h e das 18 h às 23 h
Sala de estar	Atividades leves que envolvem repouso	126	Todos os dias da semana, das 7 h às 9 h e das 16 h às 23 h
Quartos	Dormir/ descansar	72	Todos os dias, das 23 h às 7 h
Hall de entrada	Andar/ estar	140	Todos os dias da semana, das 7 h às 9 h e das 16 h às 23 h
Casas de banho	Andar/ estar	140	Todos os dias da semana, das 7 h às 8:30 h e das 18 h às 23 h
Marquise/Despensa	Trabalho leve que envolve andamento	160	Todos os dias da semana, das 7 h às 8:30 h e das 18 h às 23 h

Ainda neste separador deve ter-se em conta a densidade, ou seja, o número de ocupantes por cada m^2 de pavimento e o efeito isolante conferido pelo vestuário dos utilizadores. Considerou-se que a moradia teria 4 ocupantes e que o vestuário típico de inverno e verão ofereceria uma resistência térmica de 1,0 e 0,5 clo, respetivamente. Na Tabela 3.4 descreve-se o número de ocupantes definido para cada zona e a densidade em função do número de ocupantes e da área em causa.

TABELA 3.4 - DENSIDADE DE OCUPANTES POR ZONA

Espaço	Número de ocupantes	Área (m^2)	Densidade (ocupante/ m^2)
Cozinha	4	24,75	0,162
Sala de Estar	4	31,5	0,127
Hall de entrada	4	35,13	0,114
Quarto 1	1	17,63	0,057
Quarto 2	2	22,95	0,087
Quarto 3	1	24,99	0,040
WC1	1	5,28	0,189
WC2	1	9,60	0,104
Despensa	2	3,83	0,522
Marquise	2	9,18	0,218

Neste separador pode ainda ser definida a existência de um período de férias. Para o presente trabalho foi considerado um período de férias de 15 dias, a decorrer entre a última semana de Julho e a primeira semana de Agosto.

Iluminação e equipamentos

Quanto à iluminação, considerou-se a utilização de lâmpadas incandescentes (menos eficientes mas ainda as mais utilizadas (v. Fig.3.6)). Considerou-se também que as luminárias estariam suspensas e que a iluminação seria responsável por ganhos de 4 W m^{-2} de pavimento, tal como definido pelo RCCTE (v. Fig. 3.8).

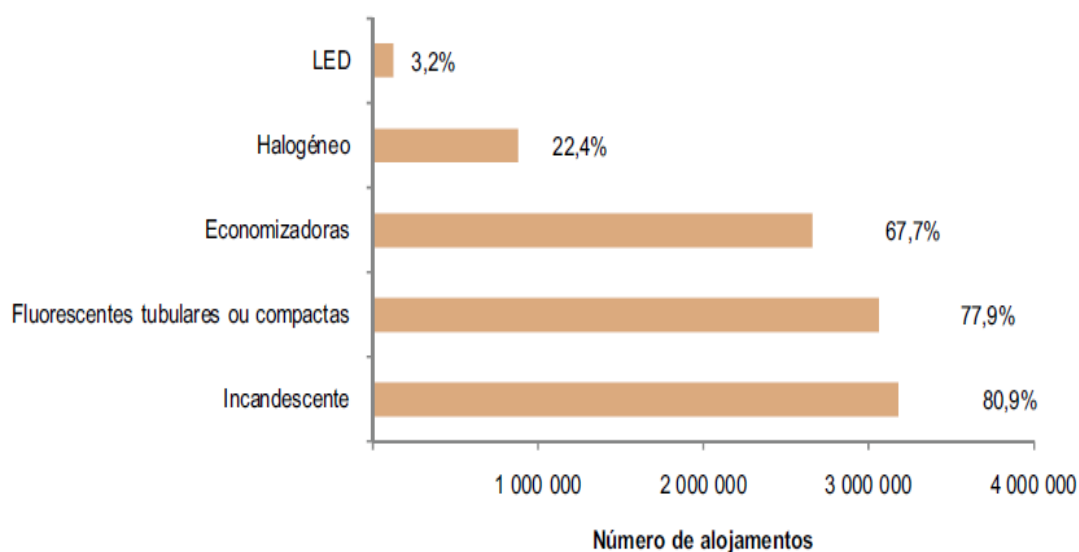
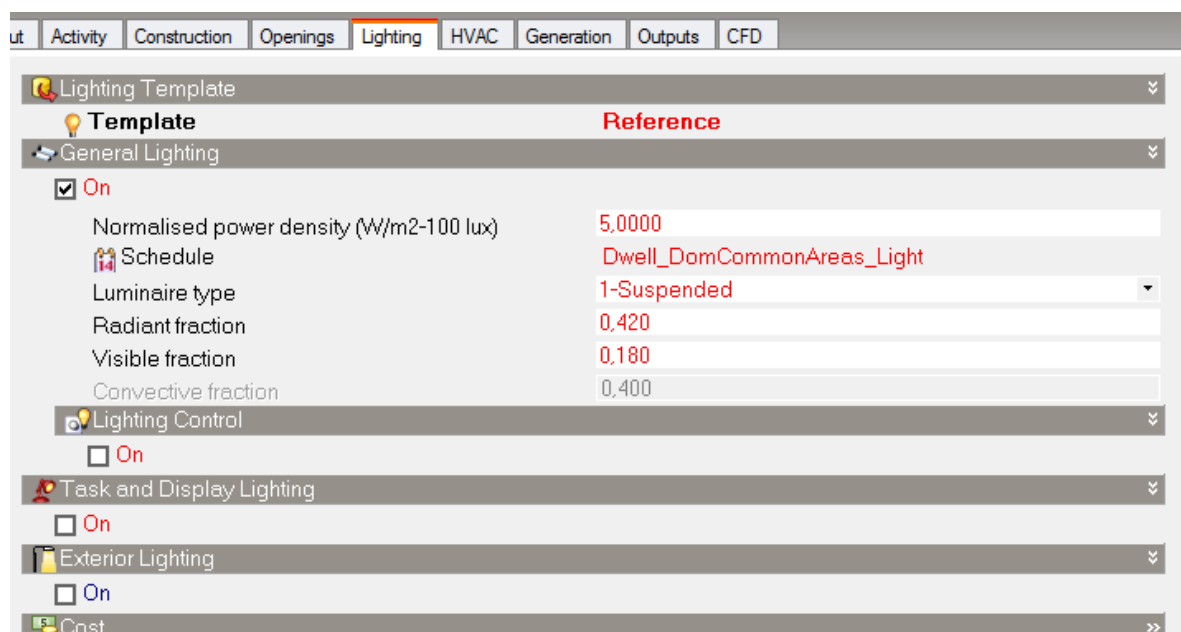


FIGURA 3.6 - TIPO DE LÂMPADA UTILIZADA NAS HABITAÇÕES EM PORTUGAL [34]

No separador do programa destinado à configuração da iluminação deve também definir-se o perfil de utilização, ou seja, o período temporal em que a iluminação é utilizada no edifício. Neste contexto, definiu-se o período de utilização das 7 h às 8:30 h e das 18 h às 23 h, todos os dias da semana.

FIGURA 3.7- SEPARADOR *LIGHTNING TEMPLATE*, DO *DESIGNBUILDER*

Relativamente aos equipamentos, considerou-se a sua existência apenas na cozinha, marquise (equipamentos utilizados na confeção e acondicionamento de alimentos e no tratamento de roupa) e na sala de estar (equipamentos utilizados para entretenimento), representando ganhos de 4 W m^{-2} de pavimento, conforme definido pelo RCCTE (v. Fig.3.8).

QUADRO IV.3

Ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento

Tipo de edificio	$q_i(\text{W/m}^2)$
Residencial	4
Serviços dos tipos: escritórios, comércio, restauração, consultórios, serviços de saúde com internamento, etc.	7
Hotéis	4
Outros edificios com pequena carga de ocupação ...	2

FIGURA 3.8- GANHOS TÉRMICOS INTERNOS DEFINIDOS PELO RCCTE [15]

Sistemas AVAC e AQS

No separador relativo aos sistemas AVAC podem ser configurados os sistemas de climatização (AVAC) e os sistemas responsáveis pelo aquecimento de águas sanitárias (v. Fig. 3.9).

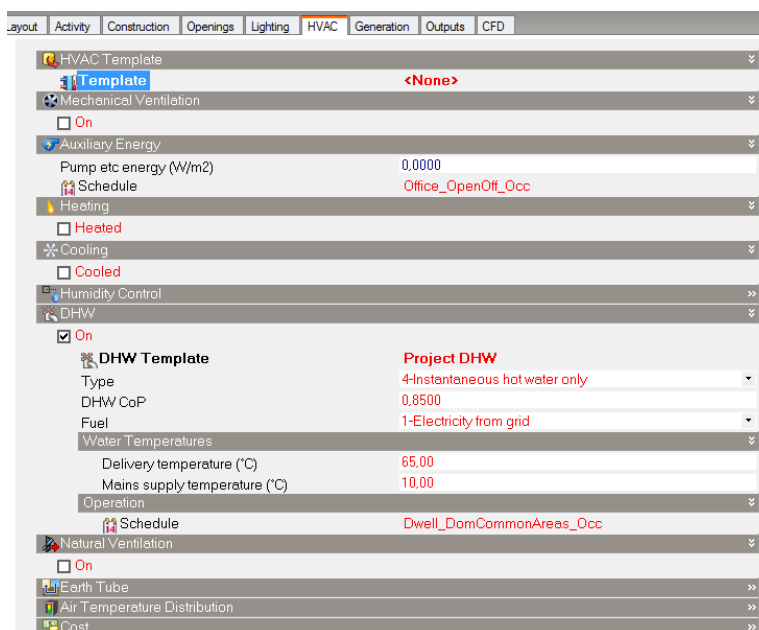


FIGURA 3.9 - ASPETO DO HVAC TEMPLATE, DO DESIGNBUILDER

A habitação de referência possui uma caldeira mural a gás natural com um COP de 0,85 que estaria preparada para o aquecimento ambiente e aquecimento de águas sanitárias. Contudo, verifica-se que a funcionalidade de aquecimento ambiente (aquecimento central) não é utilizada e a caldeira funciona exclusivamente para aquecimento de águas sanitárias, considerando-se o seu funcionamento entre as 7 h e as 8.30h e as 18 h e as 23 h. Neste contexto, optou-se pela não seleção de sistemas HVAC nas simulações efetuadas.

3.4.4 Tipologias construtivas e materiais empregues

Tal como foi referido no capítulo anterior, as soluções construtivas influenciam fortemente o desempenho térmico do edifício. Importa assim conhecer em detalhe os pormenores e materiais utilizados a fim de garantir o cumprimento das exigências térmicas. A Figura 3.10 revela o aspeto do separador do *DesignBuilder*, relativo à tipologia construtiva.

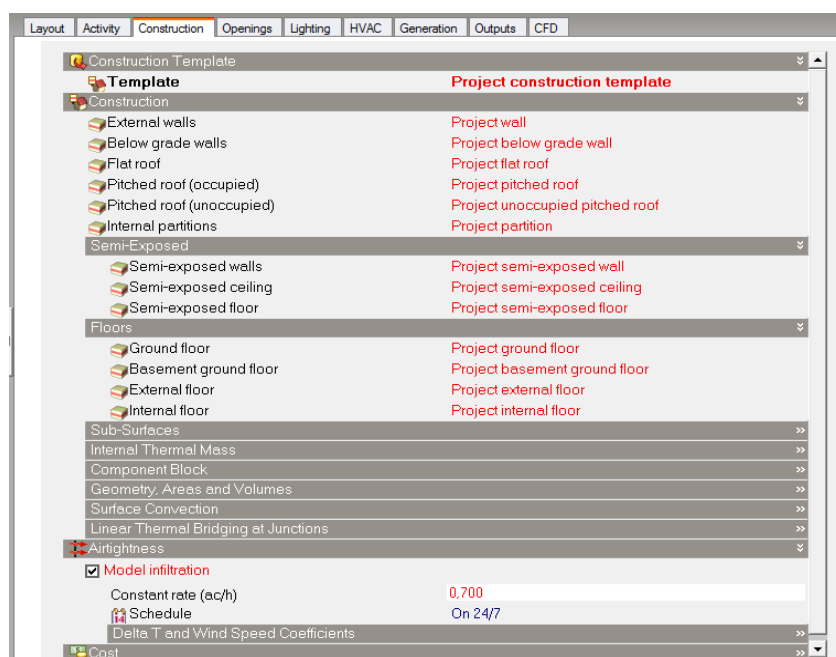


FIGURA 3.10 - ASPETO DO CONSTRUCTION TEMPLATE DO DESIGNBUILDER

No separador do programa reservado à escolha dos materiais que constituem a envolvente do edifício, atuou-se ao nível das paredes exteriores e interiores, coberturas e pavimentos. Para cada um dos elementos construtivos, o programa sugere soluções de referência e permite a criação de novas soluções que correspondam a especificações do projeto em estudo. Em caso de introdução de novas soluções construtivas, o *DesignBuilder* permite a seleção do número de camadas (*layers*) do elemento, do material que o constitui e da espessura de cada material. Aquando da

seleção do material o *software* revela numa janela lateral, as propriedades do material selecionado (v. Fig. 3.11).

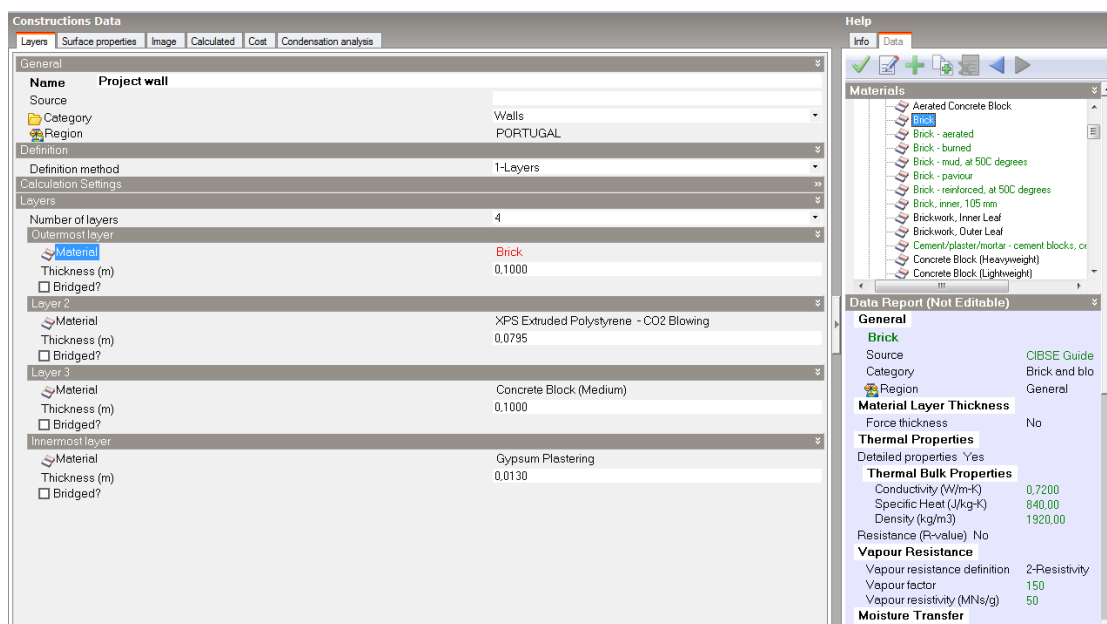


FIGURA 3.11 - CRIAÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Ao selecionar os materiais e as espessuras pretendidas, o *DesignBuilder* determina automaticamente o valor do coeficiente de transferência de calor do elemento e a respetiva resistência térmica (v. Fig. 3.12).

Constructions Data	
Layers	Surface properties
Image	Calculated
Cost	Condensation analysis
Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2,152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0,370
R-Value (m ² -K/W)	2,876
U-Value (W/m²-K)	0,348
With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Thickness (m)	0,2925
Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	134,8000
Upper resistance limit (m ² -K/W)	2,876
Lower resistance limit (m ² -K/W)	2,876
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0,370
R-Value (m ² -K/W)	2,876
U-Value (W/m²-K)	0,348

FIGURA 3.12 - CÁLCULO DO VALOR DE U E R

Descrição das soluções construtivas

Definiu-se que o Cenário A seria constituído por paredes exteriores compostas por dois panos de tijolo, havendo entre os dois, placas de poliuretano e as paredes interiores seriam compostas por um pano de tijolo, rebocadas de ambos os lados. O pavimento seria composto por enrocamento de pedra, sobre o qual seria aplicada uma laje de betão e placas de fibra de vidro, protegidas por uma camada pára-vapor. Sobre esta camada seria colocada betonilha de regularização onde assentaria o material cerâmico^{vi}. A cobertura da habitação seria composta por uma estrutura de cobertura inclinada (constituída por telha cerâmica, espaço de ar, camada impermeabilizante e placas de poliuretano revestidas por uma camada de revestimento interno) e uma laje de esteira (composta por uma laje de betão revestida por reboco e por uma camada de regularização^{vii}) (v. Figura 3.13), criando-se entre ambas um desvão não habitável (v. Anexo VII).



FIGURA 3.13 – ASPETO DA LAJE DE ESTEIRA

Para a década de 1940 consideraram-se paredes exteriores de elevada espessura em calcário (por ser a rocha dominante na zona climática onde se situa a habitação original) e paredes interiores compostas por um pano de tijolo, rebocadas de ambos os lados. O pavimento seria constituído por enrocamento de pedra, sobre o qual seria colocada uma laje de betão e uma camada de regularização onde assentaria pavimento de madeira. A cobertura seria composta por telha cerâmica protegida interiormente por um revestimento de madeira. Na solução representativa da década de 1970, assumiram-se paredes exteriores duplas de tijolo com caixa-de-ar e paredes interiores simples de tijolo, rebocadas de ambos os lados. A cobertura seria constituída por telha cerâmica, protegida pelo interior por uma película betuminosa e revestimento de madeira e o pavimento composto por enrocamento de pedra, sobre o qual seria colocada uma laje de betão. Sobre este elemento seria ainda adicionada uma camada de regularização sobre a qual assentaria o pavimento cerâmico. A Tabela 3.5 ilustra as soluções construtivas descritas anteriormente.

^{vi} Embora na solução de referência seja utilizada madeira na pavimentação dos quartos e sala (v. Anexo VII), para efeitos de simulação considerou-se que todo o pavimento estaria revestido com material cerâmico.

^{vii} A constituição desta laje manteve-se inalterada em todas as simulações.

TABELA 3.5 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS ADOTADAS

	Paredes exteriores	Cobertura	Paredes interiores	Pavimentos
Década de 2000	<p>Outer surface</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>110 mm Tijolo</p> <p>5 mm Caixa-de-ar</p> <p>50 mm Poliuretano</p> <p>110 mm Tijolo</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>Inner surface</p>	<p>Outer surface</p> <p>25 mm Telha</p> <p>15 mm Caixa-de-ar</p> <p>10 mm Impermeabilizante</p> <p>50 mm Poliuretano</p> <p>20 mm Revestimento interno</p> <p>Inner surface</p>	<p>Outer surface</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>110 mm Tijolo</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>Inner surface</p>	<p>Inner surface</p> <p>30 mm Pavimento cerâmico</p> <p>70 mm Camada de regularização</p> <p>30 mm Camada pára-vapor</p> <p>50 mm Fibra de Vidro</p> <p>200 mm Laje betão</p> <p>500 mm Rocha</p> <p>Outer surface</p>
Década de 1940	<p>Outer surface</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>400 mm Rocha calcária</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>Inner surface</p>	<p>Outer surface</p> <p>25 mm Telha cerâmica</p> <p>15 mm Espaço de ar</p> <p>10 mm Revestimento de madeira</p> <p>Inner surface</p>	<p>Outer surface</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>110 mm Tijolo</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>Inner surface</p>	<p>Inner surface</p> <p>30 mm Blocos de madeira (Pavimentos)</p> <p>70 mm Camada de regularização</p> <p>200 mm Laje betão</p> <p>500 mm Rocha sedimentar</p> <p>Outer surface</p>
Década de 1970	<p>Outer surface</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>110 mm Tijolo</p> <p>25 mm Caixa-de-ar</p> <p>110 mm Tijolo</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>Inner surface</p>	<p>Outer surface</p> <p>25 mm Telha</p> <p>15 mm Caixa-de-ar</p> <p>10 mm Camada betuminosa</p> <p>10 mm Revestimento de madeira</p> <p>Inner surface</p>	<p>Outer surface</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>110 mm Tijolo</p> <p>20 mm Reboco</p> <p>Inner surface</p>	<p>Inner surface</p> <p>30 mm Pavimento cerâmico</p> <p>70 mm Camada de regularização</p> <p>200 mm Laje betão</p> <p>500 mm Rocha</p> <p>Outer surface</p>

Finalmente, a solução construtiva descrita no Cenário C é semelhante à apresentada para a década de 1940 diferindo apenas na colocação (na face interior ou exterior) de EPS (v. Tabela 3.6 e Tabela 3.7).

TABELA 3.6 – CENÁRIO C, PAREDE EXTERIOR COM ISOLAMENTO PELO INTERIOR

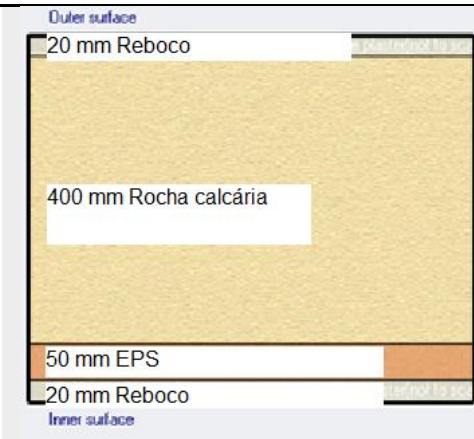
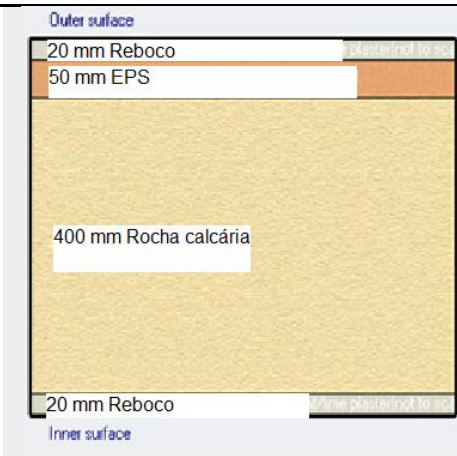
Elemento	Esquema ilustrativo
Paredes exteriores	

TABELA 3.7 – CENÁRIO C, PAREDE EXTERIOR COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR

Elemento	Esquema ilustrativo
Paredes exteriores	

Portas

As portas podem também ser definidas no *Template* relativo à seleção da construção dos restantes elementos da envolvente (v. Fig. 3.14).

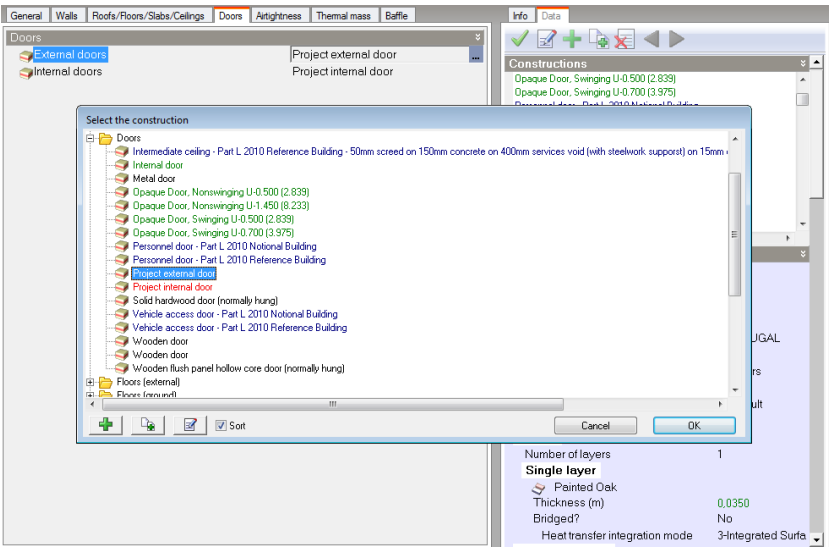


FIGURA 3.14 – CRIAÇÃO DE PORTAS NOS *DESIGNBUILDER*

Assumiu-se que no caso da moradia representativa da década de 1940, as portas interiores e exteriores seriam constituídas por madeira com uma espessura total de 3,5 cm. Nos restantes casos, assumiu-se que as portas interiores seriam igualmente em madeira, mas as exteriores seriam constituídas por duas placas de alumínio separadas por uma caixa-de-ar, perfazendo uma espessura total de 4 cm.

TABELA 3.8 - PORTAS INTERIORES E EXTERIORES

Elemento	Esquema ilustrativo
Porta de madeira	
Porta de alumínio	

Envidraçados

No caso dos envidraçados, o *software* possui um separador próprio no qual pode atuar-se ao nível do tipo de vidro, da caixilharia e do sombreamento (v. Fig. 3.15).

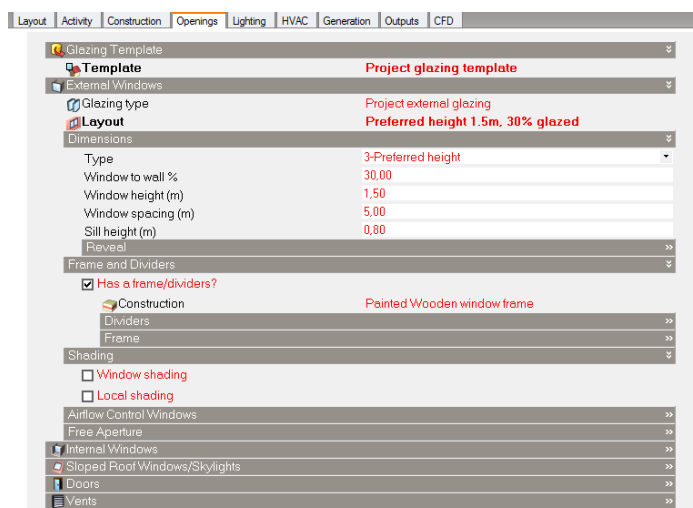


FIGURA 3.15 - SEPARADOR *GLAZING TEMPLATE*, DO *DESIGNBUILDER*

A escolha do tipo de vidro e da caixilharia são importantes no desempenho térmico das áreas envidraçadas e do edifício. Para a década de 1940, assumiu-se vidro simples, de cor clara com uma espessura de 6 mm e caixilharia de madeira. Relativamente à década de 70, assumiu-se o mesmo tipo de vidro e caixilharia em alumínio sem corte térmico. Quanto à solução construtiva representativa da situação de referência assumiu-se vidro duplo de cor clara composto por duas camadas de vidro de 6 mm, separados por uma camada de ar com uma espessura de 6 mm e caixilharia de alumínio com corte térmico. Quanto ao sombreamento, considerou-se que o mesmo seria feito através de estores de régua plásticas colocados pelo exterior, de cor clara e elevada refletividade.

Capítulo IV – Resultados e Discussão

4.1 Geometria do edifício

A Figura 4.1 mostra a geometria e as divisões interiores da habitação de referência.



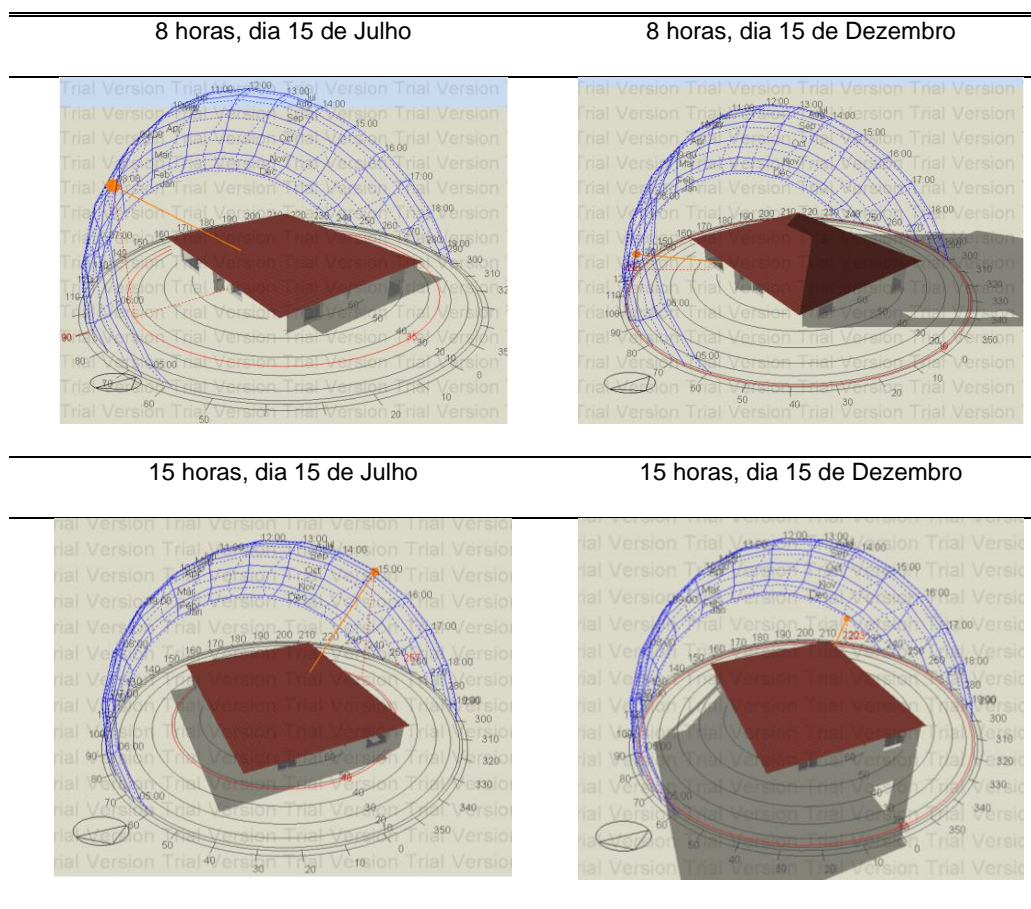
FIGURA 4.1 - GEOMETRIA DA HABITAÇÃO

4.2 Fachadas

4.2.1 Orientação de fachadas

A Tabela 4.1 apresenta o efeito da incidência da radiação solar nas fachadas da habitação a simular, nos meses típicos de verão e inverno em diferentes períodos do dia.

TABELA 4.1 – INCIDÊNCIA SOLAR NOS MESES DE JULHO E DEZEMBRO



Da análise da Tabela 4.1 verifica-se que a orientação da habitação é adequada. As fachada com maior área envidraçada (Sul e Oeste) recebem radiação solar durante o período da manhã, beneficiando de ganhos solares que contribuem para o aumento do conforto térmico na habitação. No período da tarde, quando a radiação solar é mais intensa, estas áreas não recebem radiação solar direta, estando assim protegidas de eventuais situações de sobreaquecimento. Neste período, a radiação solar incide na fachada Este, contribuindo para o aumento da temperatura na zona dos quartos, que geralmente estão desocupados neste período do dia. A fachada Norte, tal como foi mencionado em capítulos anteriores, não recebe nenhuma radiação solar direta, sendo expectável a sensação de frio nesta zona da habitação.

4.2.2 Proporção de área envidraçada por fachada

Conhecida a orientação das fachadas e a sua contribuição para o desempenho térmico da habitação, é também importante conhecer a proporção de área envidraçada, como forma de prevenir situações de sobreaquecimento ou excesso de luminosidade nos espaços. Para o cálculo

da área envidraçada, foram contabilizados os vãos envidraçados por fachada, sendo consideradas as dimensões descritas na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 - DIMENSÕES DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS, POR FACHADA

	Quantidade (-)	Dimensões (m)
Fachada Norte	2	1,80 × 2,10
	1	1,80 × 2,10
Fachada Sul	1	1,50 × 1,00
	1	3,45 × 2,10
Fachada Este	2	0,60 × 0,90
	1	2,40 × 2,10
Fachada Oeste	2	1,50 × 1,00
	1	1,80 × 2,10

A Figura 4.2 ilustra as áreas envidraçadas (marcadas a azul) e de envoltente opaca (marcadas a castanho) contabilizadas.



FIGURA 4.2 – ÁREA OPACA E ENVIDRAÇADA

Da análise da Figura 4.2 verifica-se a predominância de área envidraçada nas fachadas Sul e Oeste, o que contribui para o aproveitamento de ganhos solares. Por outro lado, pode aferir-se a relação entre a área envidraçada e a área útil de pavimento, sendo que resultados elevados podem ser sinónimos de baixas inércias térmicas. Para o caso estudado, obteve-se uma relação

$\frac{\text{Área envidraçada}}{\text{Área de pavimento}} = 16,9\%$, o que traduz uma relação moderada entre área opaca e área envidraçada.

4.3 Iluminação natural

O *DesignBuilder* permite também conhecer o desempenho do edifício no que diz respeito à iluminação natural através do fator *DF* (do inglês *Daylight Factor*). Este fator traduz o rácio entre a iluminância no interior e no exterior, sendo que valores de *DF* baixos revelam que a iluminação natural é inadequada e será necessário iluminação artificial e valores de *DF* superiores mostram que a iluminação artificial não é requerida. A Figura 4.3 mostra o fator *DF* determinado pelo *DesignBuilder* para a geometria introduzida.

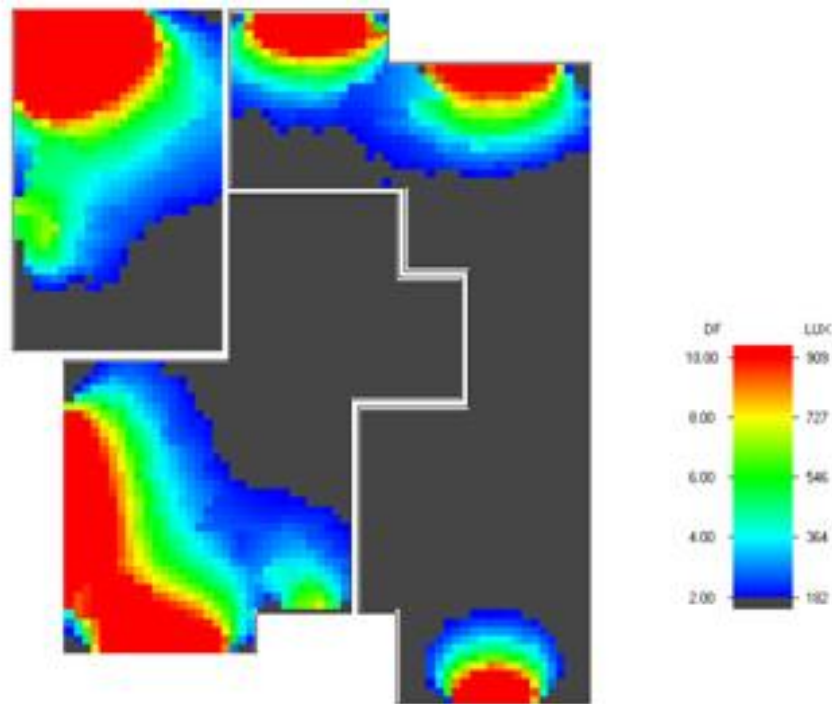


FIGURA 4.3 – ILUMINAÇÃO NATURAL

Da análise da Figura 4.3 verifica-se que as zonas da habitação com maior área envidraçada e que recebem mais radiação solar contribuem para a sua iluminação natural, porém devem ser protegidas com sistemas de sombreamento pois provocam um excesso de luminosidade nos espaços. Por outro lado, verifica-se também que a zona menos envidraçada orientada a Este não beneficia de iluminação natural, tornando-se dependente de iluminação artificial.

4.4 Análise da envolvente opaca

A Tabela 4.3 revela os valores de U e R obtidos analiticamente e pelo software para a solução construtiva de referência em função da espessura (x) e da condutibilidade térmica (λ).

TABELA 4.3 - CARACTERÍSTICAS DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA REPRESENTATIVA DA SOLUÇÃO DE REFERÊNCIA

					Resultado analítico	Resultado software
	Camada	x (m)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	R_t (W ⁻¹ m ² K)	U (W m ⁻² K ⁻¹)	U (W m ⁻² K ⁻¹)
Paredes exteriores	R_{se}			0,040	0,397	0,402
	Reboco	0,02	0,72	0,028		
	Tijolo	0,11	0,72	0,153		
	Caixa-de-ar	0,005	-	0,200		
	PUR	0,05	0,028	1,786		
	Tijolo	0,11	0,72	0,153		
	Reboco	0,02	0,72	0,028		
	R_{si}			0,130		
	Σ			2,518		
Paredes interiores	R_{si}			0,130	2,132	2,135
	Reboco	0,02	0,72	0,028		
	Tijolo	0,11	0,72	0,153		
	Reboco	0,02	0,72	0,028		
	R_{si}			0,130		
	Σ			0,469		
Cobertura	R_{se}			0,040	0,419	0,422
	Telha	0,025	1	0,025		
	Caixa-de-ar	0,015	-	0,170		
	Impermeabilizante	0,01	-	0,210		
	PUR	0,05	0,028	1,786		
	Revestimento interno	0,02	0,72	0,028		
	R_{si}			0,130		
	Σ			2,389		
Pavimento	R_{se}			0,040	0,467	0,479
	Rocha	0,5	2,3	0,217		
	Betão	0,2	1,13	0,177		
	Lã de vidro	0,05	0,035	1,429		
	Camada de proteção	0,03	-	0,010		
	Betonilha de assentamento	0,07	0,72	0,097		
	Pavimento cerâmico	0,03	0,8	0,038		
	R_{si}			0,130		
	Σ			2,140		

Verifica-se que as resistências térmicas dos elementos construtivos são elevadas, à exceção das paredes interiores, o que se deve à incorporação de isolamento nos mesmos, tornando-os mais resistentes a eventuais trocas de calor entre o interior e o exterior do edifício. A Tabela 4.4 mostra os valores obtidos para a tipologia construtiva considerada representativa da década de 1940.

TABELA 4.4 - CARACTERÍSTICAS DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA REPRESENTATIVA DA DÉCADA DE 1940

				Resultado analítico	Resultado software
Camada	x (m)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	R_t (W ⁻¹ m ² K)	U (W m ⁻² K ⁻¹)	U (W m ⁻² K ⁻¹)
R_{se}			0,040		
Reboco	0,02	0,72	0,028		
Paredes exteriores	Pedra/ Calcário	0,4	1,5	0,267	
Reboco	0,02	0,72	0,028	2,028	2,032
R_{si}			0,130		
Σ			0,493		
R_{si}			0,130		
Reboco	0,02	0,72	0,028		
Paredes interiores	Tijolo	0,11	0,72	0,153	
Reboco	0,02	0,72	0,028	2,132	2,135
R_{si}			0,130		
Σ			0,469		
R_{se}			0,040		
Telha	0,025	1	0,025		
Caixa-de-ar	0,015	-	0,170		
Cobertura	Revestimento madeira	0,01	0,12	0,083	
R_{si}			0,130	2,232	2,239
Σ			0,448		
R_{se}			0,040		
Rocha	0,5	2,3	0,217		
Betão	0,2	1,13	0,177		
Pavimento	Betonilha de assentamento	0,07	0,72	0,097	
Pavimento madeira	0,03	0,14	0,214	1,143	1,138
R_{si}			0,130		
Σ			0,875		

Da análise da Tabela 4.4 verificam-se diferenças quanto aos valores de U e R , comparativamente com os valores apresentados na Tabela 4.3. Destes resultados destaca-se o aumento dos valores de U , o que traduz numa diminuição significativa da resistência térmica dos elementos construtivos e que se deve à não incorporação de materiais isolantes. Deve ainda salientar-se a exceção verificada ao nível do pavimento, que contrariamente aos restantes elementos construtivos, apresenta uma resistência térmica considerável, devido ao facto de incorporar materiais com

condutibilidades térmicas baixas. Conclusões semelhantes podem ser retiradas em relação aos resultados obtidos para a solução construtiva da década de 1970 (v. Tabela 4.5).

TABELA 4.5 - CARACTERÍSTICAS DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA DA DÉCADA DE 1970

				Resultado analítico	Resultado software
Camada	x (m)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	R_t (W ⁻¹ m ² K)	U (W m ⁻² K ⁻¹)	U (W m ⁻² K ⁻¹)
Paredes exteriores	R_{se}		0,040	1,366	1,412
	Reboco	0,02	0,72		
	Tijolo	0,11	0,72		
	Caixa-de-ar	0,025	-		
	Tijolo	0,11	0,72		
	Reboco	0,02	0,72		
	R_{si}		0,130		
	Σ		0,732		
Paredes interiores	R_{si}		0,130	2,132	2,135
	Reboco	0,02	0,72		
	Tijolo	0,11	0,72		
	Reboco	0,02	0,72		
	R_{si}		0,130		
	Σ		0,469		
Cobertura	R_{se}		0,040	2,151	2,187
	Telha	0,025	1		
	Caixa-de-ar	0,015	-		
	Camada betuminosa	0,010	0,5		
	Revestimento madeira	0,010	0,12		
	R_{si}		0,130		
	Σ		0,465		
Pavimento	R_{se}		0,040	1,427	1,433
	Rocha	0,5	2,30		
	Betão	0,2	1,13		
	Betonilha de assentamento	0,07	0,72		
	Pavimento cerâmico	0,03	0,80		
	R_{si}		0,130		
	Σ		0,701		

A Tabela 4.6 revela os resultados obtidos para o Cenário C, que resulta da colocação de EPS na parede exterior da tipologia construtiva representativa da década de 1940.

TABELA 4.6 - CARACTERÍSTICAS DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA REPRESENTATIVA DA COLOCAÇÃO DE ISOLAMENTO NA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA DA DÉCADA DE 1940

				Resultado analítico	Resultado software
				U	U
Camada	x (m)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	R_t (W ⁻¹ m ² K)	(W m ⁻² K ⁻¹)	(W m ⁻² K ⁻¹)
R_{se}			0,04	0,620	0,617
Reboco	0,02	0,72	0,028		
EPS	0,05	0,04	1,25		
Paredes exteriores Pedra/ Calcário	0,4	2,90	0,138		
Reboco	0,02	0,72	0,028		
R_{si}			0,13		
Σ			1,614		

A colocação de isolamento (seja na face interior ou exterior) na parede exterior da solução construtiva de 1940, resulta numa diminuição de U de 2,032 W m⁻² K⁻¹ para 0,617 W m⁻² K⁻¹ (3 vezes inferior), o que resulta num aumento significativo da resistência térmica do elemento construtivo e elucida sobre o efeito da incorporação de isolamento.

A mesma análise pode ser feita relativamente a outros elementos que contribuem para as trocas térmicas entre o interior e o exterior, especialmente portas e envidraçados. A análise destes elementos torna-se especialmente importante devido às perdas decorrentes de infiltrações indesejáveis de ar nos edifícios. Relativamente às portas (v. Tabela 4.7), verifica-se que a porta de madeira oferece uma resistência à passagem de calor ligeiramente superior. Este facto deve-se à baixa condutibilidade térmica da madeira. Por outro, a existência de uma caixa-de-ar (que constitui uma camada de condutibilidade térmica muito baixa) entre as placas de metal na porta de alumínio, contribui também para um ligeiro aumento da sua resistência térmica.

TABELA 4.7 - CARACTERÍSTICAS DAS PORTAS

Elemento	U (W m ⁻² K ⁻¹)	R_t (W ⁻¹ m ² K)
Porta de madeira	2,823	0,354
Porta de alumínio	3,124	0,320

4.5 Análise da envolvente envidraçada

Determinação de U_w

O valor do coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado depende dos elementos que o compõem, nomeadamente, das propriedades térmicas do vidro e do caixilho, das ligações entre estes e da própria geometria e tipologia do vão. O valor do coeficiente de transmissão térmica de elementos envidraçados, U_w , pode ser obtido através dos princípios de cálculo descritos nas normas europeias aplicáveis EN ISO 10077-1 e EN ISO 10077-2, para janelas e portas. No caso de os elementos envidraçados estarem munidos de dispositivos de proteção solar/oclusão noturna, deve ser tida em conta no cálculo a resistência adicional oferecida por estes dispositivos através do valor do coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite U_{wdn} . Este coeficiente corresponde à média dos coeficientes de transmissão térmica de um vão envidraçado com a proteção aberta, U_d , e fechada, U_n , posição típica durante o dia e noite, respetivamente [46]. O coeficiente de transmissão térmica do envidraçado, U_w , pode ser calculado por:

$$U_w = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum l_g \psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad (4.1)$$

onde, U_g é o coeficiente de transmissão térmica do vidro, em $W m^{-2} K^{-1}$; U_f é o coeficiente de transmissão térmica da caixilharia, em $W m^{-2} K^{-1}$; ψ_g é o coeficiente de transmissão térmica linear devida ao efeito combinado do vidro, espaço de ligação e caixilho, em $W m^{-1} K^{-1}$; A_g e A_f são as áreas de vidro e caixilho, em m^2 , respetivamente e l_g é o perímetro total do vidro, em m [62].

No caso de vidros simples, o último termo do numerador da equação deve ser considerado nulo (sem efeito espaçador) e a transmitância térmica do vidro, U_g , pode ser determinada por:

$$U_g = \frac{1}{R_{se} + \sum_j \frac{e_j}{\lambda_j} + R_{si}} \quad (4.2)$$

onde, R_{se} é a resistência superficial externa; λ_j é a condutividade térmica da camada de vidro; e_j é a espessura do vidro e R_{si} é a resistência de superfície interna. Na ausência de informações específicas para o vidro em causa, deve ser utilizado o valor $\lambda = 1,0 W m^{-1} K^{-1}$ [62].

No caso do vidro duplo, o coeficiente de transmissão térmica, U_w , pode ser calculado por:

$$U_w = \frac{1}{\frac{1}{U_{w1}} - R_{si} + R_s - R_{se} + \frac{1}{U_{w2}}} \quad (4.3)$$

onde, U_{w1} e U_{w2} são os coeficientes de transmissão térmica dos panos exteriores e interiores da janela, respetivamente; R_{si} é a resistência superficial interna da janela externa quando utilizada isoladamente; R_{se} é a resistência superficial externa da janela interna quando usada sozinha e R_s é a resistência térmica do espaço entre os dois vidros [62].

Para as emissividades normais típicas ($\epsilon \geq 0,8$) e para as superfícies interiores e exteriores do vidro, os seguintes valores de R_{se} e R_{si} devem ser usados (v. Tabela 4.8):

TABELA 4.8 – RESISTÊNCIAS TÉRMICAS SUPERFICIAIS DOS ENVIDRAÇADOS [62]

Posição da janela	R_{si} $W^{-1} m^2 K$	R_{se} $W^{-1} m^2 K$
Vertical, ou com inclinação, α , do vidro com a horizontal tal que $90^\circ \geq \alpha \geq 60^\circ$ (Direção do fluxo de calor $\pm 30^\circ$ com o plano horizontal)	0,13	0,04
Horizontal, ou com inclinação, α , do vidro com a horizontal tal que $60^\circ > \alpha \geq 0^\circ$ (Direção do fluxo de calor maior que 30° com o plano horizontal)	0,10	0,04

Determinação de U_{wdn}

Um sistema de obstrução no exterior de uma janela introduz uma resistência térmica adicional, resultante tanto da camada de ar entre o sistema e a janela, como do próprio sistema de obstrução. A transmitância de uma janela com sistemas de obstrução, U_{wdn} , é dada pela equação:

$$U_{wdn} = \frac{1}{\frac{1}{U_w} + \Delta R} \quad (4.4)$$

onde, U_w é o coeficiente de transmissão térmica da janela e ΔR representa a resistência térmica adicional devida à camada de ar entre o sistema de obstrução e a janela e o próprio sistema de obstrução [62].

A Tabela G.2 do Anexo G da EN ISO 10077-1 apresenta alguns valores típicos de resistência térmica do sistema de obstrução e os correspondentes valores de ΔR , que podem ser utilizados na ausência de valores de R_{sh} obtidos a partir de medição ou cálculo (v. Figura 4.4) [62].

Shutter type	Typical thermal resistance of shutter R_{sh} $m^2 \cdot K/W$	Additional thermal resistances at specific air permeability of the shutters ^a		
		High or very high air permeability	Average air permeability	Tight or low air permeability
Roller shutters of aluminium	0,01	0,09	0,12	0,15
Roller shutters of wood and plastic without foam filling	0,10	0,12	0,16	0,22
Roller shutters of plastic with foam filling	0,15	0,13	0,19	0,26
Shutters of wood, 25 mm to 30 mm thickness	0,20	0,14	0,22	0,30
^a The definition of the air permeability of shutters is given in Annex H.				

FIGURA 4.4 – RESISTÊNCIAS TÉRMICAS ADICIONAIS CONFERIDAS POR SISTEMAS DE OBSTRUÇÃO SOLAR [62]

Determinação de U_w e U_{wdn} das situações simuladas

Como foi mencionado anteriormente para as décadas construtivas de 1940 e 1970 considerou-se que os vãos envidraçados eram compostos por vidro simples e caixilhos de madeira e alumínio, respetivamente. Neste contexto, para a determinação do coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados aplicou-se a expressão $U_w = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f}{\sum A_g + \sum A_f}$. No caso da solução construtiva de referência, considerou-se vidro duplo com caixilharia de alumínio com corte térmico. Nesta situação, utilizou-se a expressão $U_w = \frac{1}{\frac{1}{U_{w1}} - R_{st} + R_s - R_{se} + \frac{1}{U_{w2}}}$.

Os vãos envidraçados ocupam na envolvente do edifício uma área total de aproximadamente 32,99 m², sendo que este valor inclui a área de vidro (A_g) e a área da caixilharia (A_f). Para efeito de cálculo, considerou-se que a área de caixilharia ocuparia 30% da área total dos vãos envidraçados, correspondendo assim a cerca de 9,90 m², enquanto que a área de vidro corresponde a 23,09 m². Por outro lado, o software determina os coeficientes de transmissão térmica do vidro (U_g) e da caixilharia (U_f) selecionados (v. Tabela 4.9).

TABELA 4.9 - CARACTERÍSTICAS DOS ENVIDRAÇADOS

	Tipo de Vidro	U_g (W m ⁻² K ⁻¹)	R_t (W ⁻¹ m ² K)	Caixilharia	U_f (W m ⁻² K ⁻¹)	R_t (W ⁻¹ m ² K)
Década de 40	Simples	5,778	0,173	Madeira	3,633	0,275
Década de 70	Simples	5,778	0,173	Alumínio (sem corte térmico)	5,881	0,170
Referência	Duplo	3,094	0,323	Alumínio (com corte térmico)	4,719	0,212

Analisando os valores da Tabela 4.9 verifica-se que os vidros simples apresentam valores de resistência térmica inferiores quando comparados com o vidro duplo, o que pode ser explicado pela maior espessura do vidro duplo e pela presença de um gás (caracterizado por condutibilidades térmicas muito baixas) no interior das suas camadas de vidro. Por outro lado a caixilharia tem também uma contribuição importante neste contexto, porque também ela é responsável pela maior ou menor dissipação de calor entre o interior e o exterior da habitação. Neste caso, a caixilharia de alumínio com corte térmico é a que mostra oferecer maior resistência à passagem de calor devido à incorporação de PVC (material caracterizado por baixa condutibilidade térmica) na sua constituição, seguida pela caixilharia em madeira.

Para a determinação do coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados com sistemas de obstrução, utilizou-se a equação $U_{wdn} = \frac{1}{\frac{1}{U_w} + \Delta R}$, considerando que a resistência térmica adicional conferida pela camada de ar entre o sistema de obstrução solar e o vidro foi de $0,16 \text{ W}^{-1} \text{ m}^2 \text{ K}$ (v. Figura 4.4).

Aplicando os valores e as expressões anteriormente descritas, obtiveram-se os resultados presentes na Tabela 4.10, verificando-se que a introdução de sistemas de obstrução solar contribui para a diminuição significativa do coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados. Estes resultados atestam a importância dos sistemas de proteção solar nos vãos envidraçados.

TABELA 4.10 – COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS

Cenário	Descrição	U_w ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)	U_{wdn} ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
Década de 1940	Caixilharia de madeira, de correr, vidro simples (6 mm de espessura), proteção solar através de persianas de réguas plásticas de cor clara	5,09	2,56
Década de 1970	Caixilharia de alumínio, de correr, vidro simples (6 mm de espessura), proteção solar através de persianas de réguas plásticas de cor clara	5,77	2,75
Referência	Caixilharia metálica em alumínio com corte térmico, de correr, vidro duplo (6 mm de espessura da lâmina de ar), com proteção solar através de persianas de réguas plásticas de cor clara	3,58	2,13

4.6 Conformidade com a legislação

Desde a entrada em vigor de legislação específica, as edificações devem obedecer a um conjunto de características estruturais predefinidas. Para que se encontrem em conformidade, um dos parâmetros a que devem obedecer diz respeito ao valor do coeficiente de transmissão térmica máximo admissível para os elementos opacos da envolvente, consoante a zona climática.

A habitação estudada foi construída no início da década de 2000, estando ainda em vigor o Decreto-Lei nº 40/90, de 6 de Fevereiro. Este diploma legal impunha coeficientes de transmissão térmica máximos para paredes e coberturas (v. Fig. 4.5).

Quadro II.3
Coefficientes de transmissão térmica máximos admissíveis
(K—W/m²°C)

Elemento da envolvente	Zona climática (*)		
	I ₁	I ₂	I ₃
Elementos exteriores:			
Zonas opacas horizontais	1,25	1	0,9
Zonas opacas verticais	1,8	1,6	1,45
Elementos interiores (**):			
Zonas opacas verticais	2	2	1,9
Zonas opacas horizontais	1,65	1,3	1,2

(*) V. anexo III.
(**) Para zonas anexas não úteis.

FIGURA 4.5 - COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA MÁXIMOS ADMISSÍVEIS PELO DL Nº 40/90 [68]

A Tabela 4.11 compara os coeficientes de transmissão térmica obtidos para as situações simuladas, com os valores máximos admissíveis pelo diploma legal.

TABELA 4.11 - CONFORMIDADE DOS RESULTADOS COM O DL Nº 40/90

Descrição	Elementos verticais		Elementos horizontais	
	U (W m ⁻² K ⁻¹)		U (W m ⁻² K ⁻¹)	
	Valor obtido	Valor máximo permitido	Valor obtido	Valor máximo permitido
Década de 40	2,032	1,60	2,239	1
Década de 70	1,412	1,60	2,187	1
Situação de referência	0,402	1,60	0,422	1

Legenda:

Conforme	Não conforme
----------	--------------

A análise da Tabela 4.11 permite verificar que a solução de referência se encontra em conformidade com os limites fixados pelo diploma legal, o que não se observa em relação às soluções construtivas representativas das décadas anteriores. Esta não conformidade pode ser explicada pelo facto de esta legislação ter entrado em vigor apenas na década de 1990, posteriormente à data da suposta construção das respetivas soluções construtivas.

Verificada a (in)conformidade das soluções simuladas com a legislação em vigor à data de construção da solução de referência, decidiu verificar-se a (in)compatibilidade dos valores obtidos com o diploma legal atualmente em vigor. Neste contexto, foram comparados os valores de U obtidos, com os coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis para elementos opacos, previstos pela Portaria 349-B/ 2013 (v. Fig. 4.6).

TABELA I.05

Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos, $U_{máx}$ [W/(m².°C)]

$U_{máx}$ [W/(m ² .°C)]		Zona Climática		
		I1	I2	I3
Elemento da envolvente em contacto com o exterior ou espaços não úteis com $b_{tr} > 0.7$	Elementos verticais	1,75	1,60	1,45
	Elementos horizontais	1,25	1,00	0,90
Elemento da envolvente em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos verticais	2,00	2,00	1,90
	Elementos horizontais	1,65	1,30	1,20

FIGURA 4.6 - COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA MÁXIMOS ADMISSÍVEIS SEGUNDO A PORTARIA 349-B/2013

Verifica-se que os valores máximos admissíveis coincidem com os valores apresentados no decreto-lei nº 40/90, registando-se portanto as mesmas conclusões descritas anteriormente. Por outro lado, a mesma Portaria impõe coeficientes de transmissão térmica de referência para os envidraçados (v. Fig. 4.7).

Coefficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, U_{ref} [W/(m².°C)]

U_{ref} [W/(m ² .°C)]		Zona Climática					
		Portugal Continental					
Zona corrente da envolvente:		Com a entrada em vigor do presente regulamento			31 de dezembro de 2015		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3
em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} > 0.7$	Elementos opacos verticais	0,50	0,40	0,35	0,40	0,35	0,30
	Elementos opacos horizontais	0,40	0,35	0,30	0,35	0,30	0,25
em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis	Elementos opacos verticais	1,00	0,80	0,70	0,80	0,70	0,60
com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos opacos horizontais	0,80	0,70	0,60	0,70	0,60	0,50
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U_w)		2,90	2,60	2,40	2,80	2,40	2,20
Elementos em contacto com o solo		0,50			0,50		

FIGURA 4.7 - COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DE REFERÊNCIA ADEQUADOS A PARTIR DE 31 DE DEZEMBRO DE 2015 SEGUNDO A PORTARIA 349-B/2013

Quanto aos vãos envidraçados, verifica-se que para que os requisitos legais sejam cumpridos é necessário incorporar vidro duplo, caixilharia de alumínio com rutura de ponte térmica e sistemas de obstrução solar composto por estores de régua plástica de cor clara (solução de referência) (v. Tabela 4.12).

TABELA 4.12 - CONFORMIDADE DOS RESULTADOS COM A PORTARIA 349-B/2013 (ENVOLVENTE ENVIDRAÇADA)

Cenário	U_w calculado (W m ⁻² K ⁻¹)	U_{wdn} calculado (W m ⁻² K ⁻¹)	U_w máximo admissível (W m ⁻² K ⁻¹)
Década de 1940	5,09	2,56	2,40
Década de 1970	5,77	2,75	
Referência	3,58	2,13	

Legenda:

Conforme	Não conforme
----------	--------------

4.7 Determinação da inércia térmica

A inércia térmica na construção civil, tal como já foi referido anteriormente, está relacionada com a transferência de calor entre o ambiente externo e o interno e a otimização desta técnica assegura o conforto térmico no interior do edifício. A inércia térmica depende da massa superficial útil (M_{si}) de cada um dos elementos da construção, expressa em kg m⁻² e é função da sua localização no

edifício e da sua constituição e do isolamento térmico, podendo ser determinada pela expressão

$$I_t = \frac{\sum_i M_{si} r_{si}}{A_p}$$

e pode ser classificada em fraca (se $I_t < 150 \text{ kg m}^{-2}$), média (se $150 \text{ kg m}^{-2} \leq I_t \leq$

400 kg m^{-2}) ou forte (se $I_t > 400 \text{ kg m}^{-2}$).

No caso de elementos da envolvente exterior ou interior, ou elementos em contacto com outra fração autónoma ou com edifício adjacente, o valor de M_{si} nunca pode ser superior a 150 kg/m^2 , sendo que:

- a) no caso de paredes sem isolamento térmico e de coberturas pesadas:
 - i. se não existir caixa-de-ar, $M_{si} = \frac{m_t}{2}$, em que m_t corresponderá à massa total do elemento;
 - ii. se tiver caixa-de-ar, $M_{si} = m_{pi}$, onde m_{pi} corresponderá à massa do elemento desde a caixa de ar até à face interior;
- b) para todos os elementos com uma camada de isolamento térmico, $M_{si} = m_i$, em que m_i corresponde à massa do elemento desde o isolamento térmico até à face interior, com exceção das situações em que exista uma caixa-de-ar entre o isolamento térmico e a face interior, m_i corresponderá à massa do elemento desde a caixa-de-ar até à face interior.

No caso de elementos em contacto com o solo, o valor de M_{si} nunca pode ser superior a 150 kg/m^2 , sendo que:

- a) no caso de elementos sem isolamento térmico, M_{si} corresponderá a 150 kg/m^2 ;
- b) no caso de elementos com isolamento térmico, $M_{si} = m_i$, onde m_i corresponderá à massa do elemento desde o isolamento térmico até à face interior [63].

De acordo com o que foi referido anteriormente, na Tabela 4.13 encontra-se o cálculo da massa superficial útil dos elementos construtivos das soluções construtivas estudadas, que resulta da relação entre a espessura (x) e a massa volúmica aparente seca (ρ).

TABELA 4.13 - CÁLCULO DA MASSA SUPERFICIAL ÚTIL

	Elemento construtivo	Material	x (m)	ρ (kg m ⁻³)	m_t (kg m ⁻²)	M_{si} (kg m ⁻²)
Solução construtiva de referência	Cobertura	Telha	0,025	2000	50	36,95
		Caixa-de-ar	0,015	-	-	
		Impermeabilizante	0,01	-	-	
		PUR	0,05	35	1,75	
		Revestimento interior	0,02	1760	35,2	
	Pavimento	Rocha	0,5	1500	750	175,45
		Betão	0,2	2000	400	
		Fibra de vidro	0,05	25	1,25	
		Camada pára-vapor	0,03	-	-	
		Camada de assentamento	0,07	1760	123,2	
		Pavimento Cerâmico	0,03	1700	51	
	Paredes externas	Reboco	0,02	1760	35,2	248,15
		Tijolo	0,11	1920	211	
		Caixa-de-ar	0,005	-	-	
		PUR	0,05	35	1,75	
		Tijolo	0,11	1920	211,2	
		Reboco	0,02	1760	35,2	
	Paredes interiores	Reboco	0,02	1760	35,2	$\frac{281,6}{2} = 140,8$
		Tijolo	0,11	1920	211,2	
		Reboco	0,02	1760	35,2	
	Laje desvão não habitado	Reboco	0,02	1760	35,2	483,2
		Betão	0,18	2000	360	
		Camada de regularização	0,05	1760	88	
Solução construtiva – Década de 1940	Cobertura	Telha	0,025	2000	50	5,1
		Caixa-de-ar	0,015	-	-	
		Revestimento madeira	0,01	510	5,1	
	Pavimento	Rocha sedimentar	0,5	1500	750	150
		Betão	0,2	2000	400	
		Betonilha de assentamento	0,07	1760	123,2	
		Madeira (pavimentos)	0,03	650	19,5	
	Paredes externas	Reboco	0,02	1700	35,2	942,4
		Pedra calcária	0,4	2180	872	
		Reboco	0,02	1760	35,2	
	Paredes interiores	Reboco	0,02	1760	35,2	$\frac{281,6}{2} = 140,8$
		Tijolo	0,11	1920	211,2	
		Reboco	0,02	1760	35,2	
	Laje desvão não habitado	Reboco	0,02	1760	35,2	483,2
		Betão	0,18	2000	360	
		Camada de regularização	0,05	1760	88	
Solução construtiva – Década de 1970	Cobertura	Telha	0,025	2000	50	22,1
		Caixa-de-ar	0,015	-	-	
		Camada betuminosa	0,01	1700	17	
		Revestimento madeira	0,01	510	5,1	
	Pavimento	Rocha sedimentar	0,5	1500	750	150
		Betão	0,2	2000	400	
		Betonilha de assentamento	0,07	1760	123,2	
		Material cerâmico	0,03	1700	51	
	Paredes externas	Reboco	0,02	1760	35,2	246,4
		Tijolo	0,11	1920	211,2	
		Caixa-de-ar	0,025	-	-	
		Tijolo	0,11	1920	211,2	
	Paredes interiores	Reboco	0,02	1760	35,2	$\frac{281,6}{2} = 140,8$
		Tijolo	0,11	1920	211,2	
		Reboco	0,02	1760	35,2	

Elemento construtivo	Material	x (m)	ρ (kg m ⁻³)	m_t (kg m ⁻²)	M_{si} (kg m ⁻²)
Laje desvão não habitado	Reboco	0,02	1760	35,2	483,2
	Betão	0,18	2000	360	
	Camada de regularização	0,05	1760	88	

De acordo com as especificações referidas anteriormente para a contabilização da massa superficial útil, foram apenas contabilizados os elementos coloridos na tabela. Como a contribuição dos elementos construtivos é superior ao valor máximo estipulado de 150 kg m⁻², assume-se este valor para efeito de cálculo. No caso das paredes de compartimentação interior, por se tratar de elementos construtivos sem isolamento e caixa-de-ar, $M_{si} = \frac{m_t}{2}$, logo apenas metade do valor calculado é utilizado no cálculo da inércia térmica e no caso dos pavimentos não isolados termicamente considerou-se automaticamente o valor de 150 kg m⁻².

Quanto ao fator de redução da massa superficial, r , depende da resistência térmica do revestimento superficial interior, com inclusão da resistência térmica de uma eventual caixa-de-ar associada, R , considerando-se a aplicação dos seguintes critérios:

- i. se $R > 0,3 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$, o fator de redução toma o valor 0;
- ii. se $0,14 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1} < R \leq 0,3 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$, o fator de redução toma o valor 0,5;
- iii. se $R \leq 0,14 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$, o fator de redução toma o valor 1.

No caso de estudo, as resistências térmicas oferecidas pelos revestimentos superficiais interiores são inferiores a $0,14 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$, logo o fator de redução, r , toma o valor 1.

Ao verificar-se que a massa superficial útil de todos os elementos construtivos das soluções estudadas excede o valor máximo admissível de 150 kg m⁻², é expectável que a habitação seja detentora de inércia térmica forte. Admitindo que a área da cobertura é idêntica à área útil de pavimento e varia em função da espessura das paredes exteriores e calculando a área da superfície interior das paredes exteriores, obtêm-se os seguintes resultados:

TABELA 4.14 - CÁLCULO DA INÉRCIA TÉRMICA

	I_t (kg m ⁻²)	Classificação
Solução de referência	482	Forte
Solução construtiva década de 1940	445	Forte
Solução construtiva década de 1970	468	Forte

Pode afirmar-se que em todas as situações analisadas, a habitação estudada tem uma inércia térmica forte, uma vez que o limite para a classificação em Inércia Forte ($I_t > 400 \text{ kg m}^{-2}$) foi ultrapassado, mesmo sem a contabilização da contribuição dada pelas paredes de compartimentação interna.

4.8 Resultados relativos aos cenários definidos

O programa de simulação utilizado na elaboração do presente trabalho permite a obtenção de inúmeros resultados acerca do desempenho energético e térmico do edifício. Contudo, optou-se pela seleção de apenas alguns parâmetros considerados mais relevantes para a temática do trabalho, nomeadamente: perdas pela envolvente, ganhos internos, consumo de energia e conforto térmico (através do índice *PMV*).

4.8.1 Resultados Cenário A

A.1 Simulação da solução construtiva de referência

Balanço térmico

Para calcular as perdas pela envolvente, o *software* admite estado estacionário e considera a temperatura externa de projeto no inverno, não sendo considerados os ganhos solares nem os ganhos internos (iluminação, equipamentos e ocupação) [64]. As perdas de calor pela envolvente são o fator mais significativo para o cálculo das cargas térmicas e, devido ao seu peso no resultado final, devem incluir-se todos os elementos da envolvente (paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos). A Figura 4.8 apresenta os dados obtidos para a solução construtiva de referência.

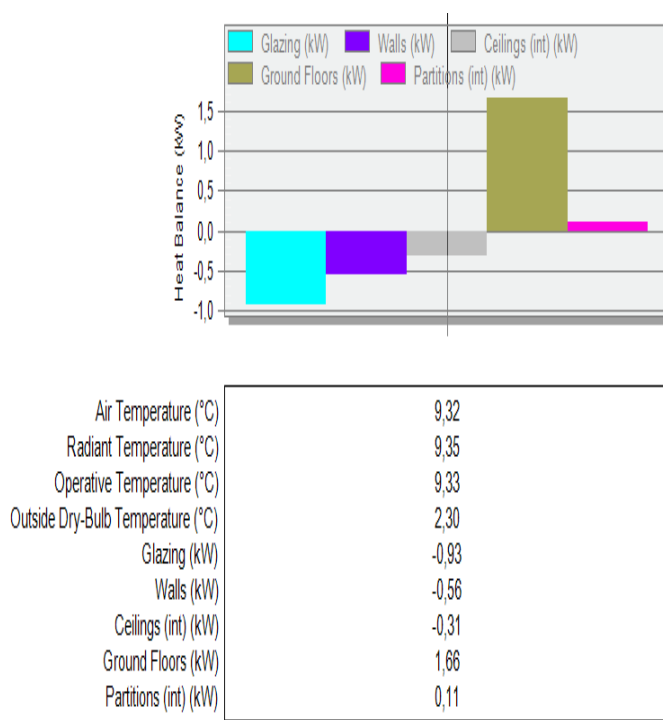


FIGURA 4.8 – BALANÇO TÉRMICO, SOLUÇÃO DE REFERÊNCIA

Verifica-se através da análise da Figura 4.8 que as perdas de calor pela envolvente se devem essencialmente às paredes em contacto com o exterior (-0,56 kW) e aos envidraçados (-0,93 kW). As perdas pela cobertura são menos significativas e os pavimentos representam uma entrada de calor no edifício, o que pode ser explicado pelo facto de o *software* apresentar estes resultados para o dia típico de inverno (ou seja para o dia com as condições climáticas mais rigorosas). Desta forma, estando o pavimento em contacto direto com o solo, que mantém a sua temperatura praticamente constante ao longo do ano, as trocas de calor dão-se, neste caso, do exterior para o interior da habitação. Pode ainda mencionar-se que pelo facto de não se terem considerado sistemas de climatização, nomeadamente para aquecimento de espaços interiores, o interior da habitação registará tendencialmente temperaturas relativamente baixas, principalmente no período de inverno. Este facto reforça a ideia de que as trocas de calor entre o solo e a habitação decorrem no sentido contrário às trocas entre o meio exterior (ar) e a habitação.

Ganhos internos

Os ganhos internos resultam do efeito da iluminação, equipamentos, ocupação e dos ganhos solares pelos envidraçados. Os resultados obtidos para a solução de referência estão representados na Figura 4.9.

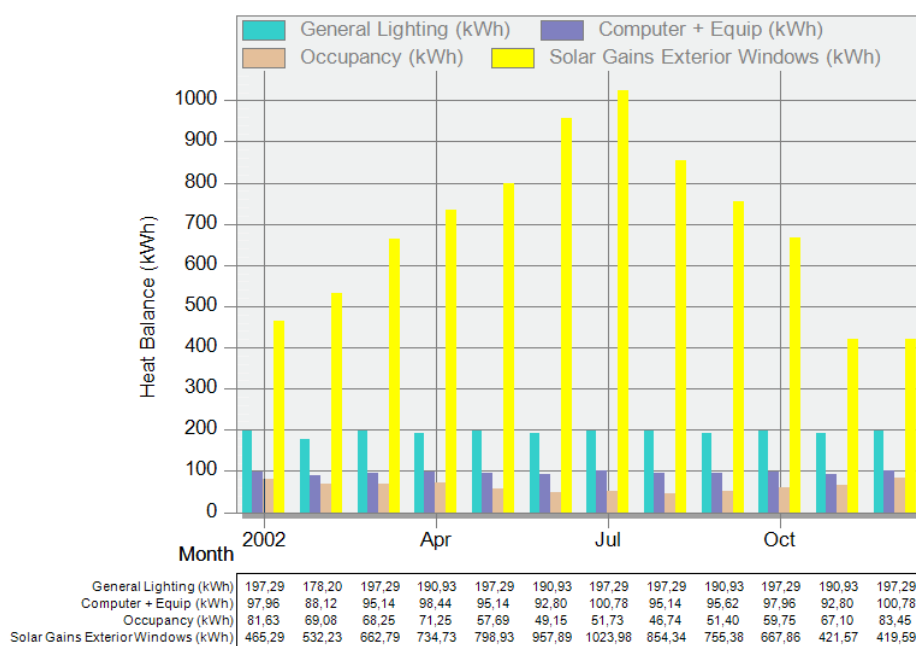


FIGURA 4.9 - GANHOS INTERNOS, SOLUÇÃO DE REFERÊNCIA

Os ganhos devido à entrada de radiação solar pelos envidraçados são os mais significativos. Como seria expectável os ganhos solares vão aumentando até aos meses de Verão, quando

atingem os valores mais elevados e vão gradualmente diminuindo com a proximidade do Inverno. O contrário pode observar-se quanto aos ganhos resultantes da ocupação que vão diminuindo ao longo do ano, atingindo valores inferiores no período de Verão, uma vez que se definiu que nesta altura decorreria um período de férias, no qual a habitação estaria desocupada durante alguns dias. Os ganhos devido a iluminação e a equipamentos mantêm-se praticamente constantes ao longo do ano.

Consumo mensal de energia

A simulação no *DesignBuilder* permite igualmente determinar os consumos de energia elétrica e de gás natural associados à situação em estudo. A Figura 4.10 apresenta os resultados obtidos para o consumo mensal de energia.

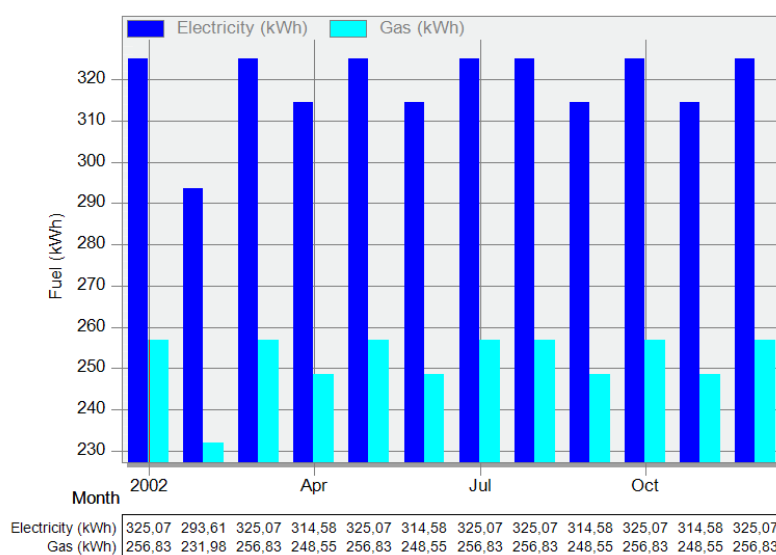


FIGURA 4.10 - CONSUMO DE ENERGIA, SOLUÇÃO DE REFERÊNCIA

A predominância do consumo de energia elétrica em relação ao consumo de gás natural para aquecimento de AQS é clara. Esta diferença deve-se ao facto de as exigências de energia elétrica serem muito superiores às de água quente, uma vez que a eletricidade é utilizada na iluminação de espaços e no funcionamento de equipamentos, enquanto o gás natural apenas é consumido na caldeira para aquecimento de água, encontrando-se a funcionar num período temporal mais reduzido. Deve ainda referir-se que o consumo de energia elétrica se deve principalmente à iluminação, uma vez que o tipo de iluminação selecionado não é o mais eficiente e que a iluminação se encontra em toda a habitação, contrariamente aos equipamentos que apenas foram considerados em algumas zonas do edifício em estudo (v. Fig. 4.11).

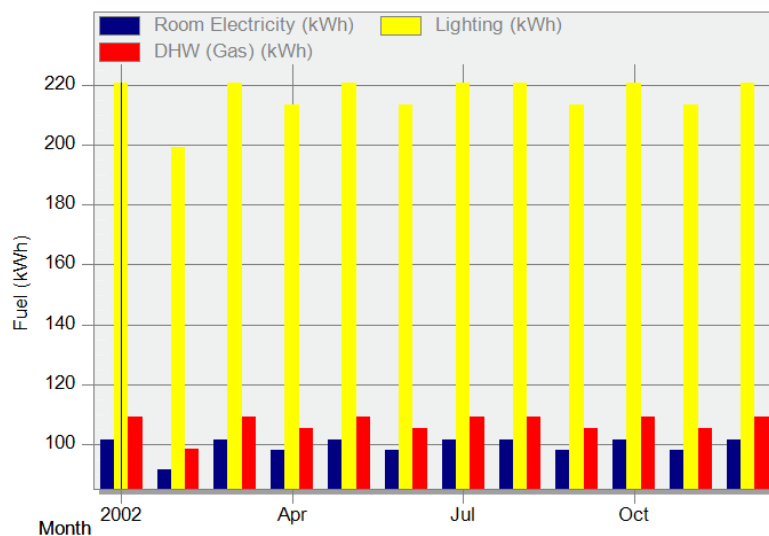


FIGURA 4.11- CONSUMO DE ENERGIA POR UTILIZAÇÃO

Como forma de verificar a similaridade entre os valores obtidos e o consumo real de energia elétrica da habitação em estudo, recolheram-se as faturas de energia elétrica da habitação para o período de um ano. A Figura 4.12 mostra a comparação entre os resultados obtidos pela simulação e os dados recolhidos da faturação.

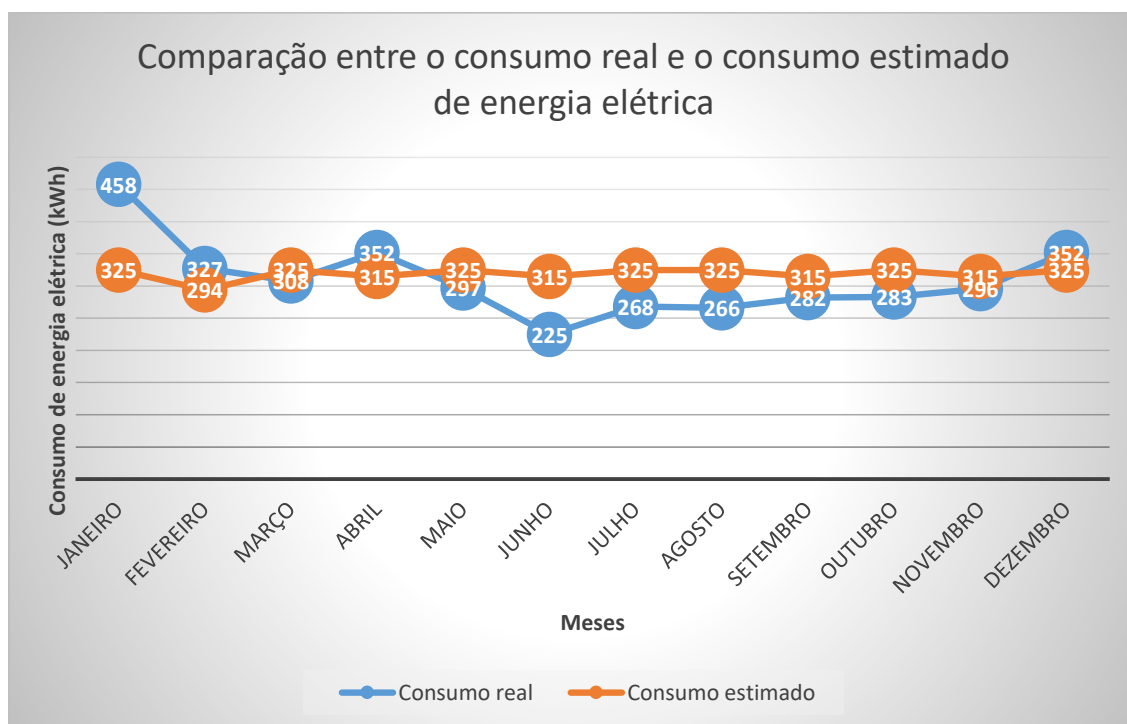


FIGURA 4.12 – COMPARAÇÃO ENTRE O CONSUMO SIMULADO E O CONSUMO REAL DE ENERGIA ELÉTRICA

Da comparação entre os dados recolhidos nas faturas e os resultados obtidos através da simulação, verifica-se um desvio explicado pela falta de informação mais pormenorizada acerca dos períodos de ocupação, dos equipamentos instalados e da iluminação e ao facto de terem sido pressupostas várias variáveis envolvidas no processo de simulação. Por outro lado, os resultados da simulação foram apenas comparados com os dados recolhidos das faturas do período de um ano. Para um resultado mais consistente, deveriam ser efetuadas comparações entre faturas de um período temporal maior, a fim de se verificar o padrão de consumo do agregado familiar.

Conforto térmico

A Tabela 4.15 apresenta os índices PMV determinados para a solução de referência, para as diferentes zonas climáticas.

TABELA 4.15 – ÍNDICE PMV, SOLUÇÃO DE REFERÊNCIA

Zona climática Inverno	Zona climática Verão	Município	Meses											
			Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
I ₁	V ₁	-												
	V ₂	Porto	-1,85	-1,60	-1,05	-2,20	-1,55	-0,53	0,02	-0,04	-0,36	-0,27	-1,06	-1,69
	V ₃	Albufeira	-2,32	-1,99	-1,68	-2,35	-2,30	-0,35	0,44	0,49	-0,01	-0,60	-1,46	-1,94
I ₂	V ₁	-												
	V ₂	Pombal	-1,89	-1,54	-1,17	-2,23	-1,61	-0,76	-0,30	-0,21	-0,55	-0,28	-1,10	-1,63
	V ₃	Abrantes	-1,79	-1,58	-1,12	-2,08	-1,46	-0,30	0,39	0,37	-0,09	-0,18	-1,03	-1,61
I ₃	V ₁	-												
	V ₂	Bragança	-2,85	-2,54	-1,74	-2,16	-2,53	-1,28	-0,12	-0,48	-1,30	-1,06	-2,02	-2,62
	V ₃	-												

Legenda:

Escala	-2 a -3	-1 a -2	0 a -1	0	0 a 1	1 a 2	2 a 3
Sensação	Muito Frio	Frio	Ligeiramente Frio	Confortável	Ligeiramente Quente	Quente	Muito Quente

Ao nível do conforto térmico, verifica-se que de Janeiro a Maio predominam as sensações de Frio ou Muito Frio e os valores mais elevados (logo de maior desconforto) dizem respeito às zonas climáticas caracterizadas por temperaturas exteriores mais baixas no período de inverno. Nos três meses típicos de verão (Junho, Julho e Agosto) verifica-se a predominância da sensação de Ligeiramente Quente ou Ligeiramente Frio e verifica-se que nestes meses, e uma vez que do ponto de vista prático se aceitam níveis de conforto de $0 \pm 0,5$ (assinalados nas tabelas a vermelho), assiste-se a uma predominância da sensação de conforto. Esta sensação é prolongada no mês de Setembro e Outubro em três das zonas climáticas analisadas. Nos restantes meses, e

com a proximidade do inverno, volta a predominar a sensação de Frio. Deve salientar-se também que os níveis de conforto obtidos para a zona climática I₃ V₂ revelam que a solução construtiva mesmo contendo isolamento térmico não é adequada à zona climática, o que reforça a ideia de que não existem soluções construtivas padrão e que a influência do clima deve ser tida em conta na fase de projeto.

A.2 Simulação da solução construtiva de referência com o dobro do isolamento

A fim de averiguar se a duplicação da espessura de isolamento na habitação é proveitosa ao nível do conforto térmico, decidiu determinar-se o índice PMV para a zona geográfica de referência (Pombal). Os impactos ao nível do conforto podem ser observados na Tabela 4.16.

TABELA 4.16 - ÍNDICE PMV, SOLUÇÃO DE REFERÊNCIA COM O DOBRO DO ISOLAMENTO

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Referência	-1,89	-1,54	-1,17	-2,23	-1,61	-0,76	-0,30	-0,21	-0,55	-0,28	-1,10	-1,63
Dobro do isolamento	-1,82	-1,48	-1,13	-2,20	-1,60	-0,79	-0,33	-0,25	-0,55	-0,25	-1,05	-1,57

Legenda:

Escala	-2 a -3	-1 a -2	0 a -1	0	0 a 1	1 a 2	2 a 3
Sensação	Muito Frio	Frio	Ligeiramente Frio	Confortável	Ligeiramente Quente	Quente	Muito Quente

Da análise da Tabela 4.16 conclui-se que a duplicação da espessura de isolamento resulta na ligeira melhoria dos níveis de conforto térmico e na amenização dos níveis de desconforto. Uma vez que a habitação simulada é detentora de uma inércia térmica forte, os resultados obtidos pela duplicação da espessura de isolamento não são tão expressivos quanto seria expectável. Neste contexto, uma eventual tomada de decisão sobre um aumento da espessura de isolamento na habitação deve ser complementada com um estudo económico, a fim de se ponderar a relação custo-benefício.

A.3 Simulação da solução construtiva de referência com vidro de baixa emissividade

Tal como foi referido em capítulos anteriores, os envidraçados representam um papel importante ao nível do desempenho térmico dos edifícios. A utilização de vidro de baixa emissividade não

diminui significativamente as perdas de calor, comparativamente ao vidro normal. Porém, ao nível do conforto térmico, esta opção revela-se importante.

A Tabela 4.17 revela os níveis de conforto obtidos para a solução construtiva de referência na localização geográfica de origem e pretende mostrar a influência do tipo de envidraçado no conforto térmico do edifício. Neste contexto, foram simuladas três situações: vidro simples de cor clara com 6 mm de espessura, vidro duplo de cor clara de 6 mm preenchido por ar (6 mm de espessura) e vidro triplo (com espessura de 6 mm e cor clara), preenchido por uma camada de árgon (com 13 mm de espessura) e película de baixa emissividade (*LowE*). Em todas as simulações foi considerada caixilharia de alumínio com corte térmico.

TABELA 4.17 - ÍNDICE PMV, SOLUÇÃO DE REFERÊNCIA COM VIDRO DE BAIXA EMISSIVIDADE

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Vidro simples	-1,91	-1,57	-1,19	-2,24	-1,63	-0,79	-0,28	-0,22	-0,58	-0,33	-1,17	-1,64
Vidro duplo	-1,89	-1,54	-1,17	-2,23	-1,61	-0,76	-0,30	-0,21	-0,55	-0,28	-1,10	-1,63
Vidro triplo de baixa emissividade	-1,81	-1,52	-1,13	-2,18	-1,59	-0,67	-0,22	-0,16	-0,51	-0,25	-1,06	-1,59

Legenda:

Escala	-2 a -3	-1 a -2	0 a -1	0	0 a 1	1 a 2	2 a 3
Sensação	Muito Frio	Frio	Ligeiramente Frio	Confortável	Ligeiramente Quente	Quente	Muito Quente

Constata-se que a escolha correta de envidraçados contribui, por si só, para o aumento do conforto térmico na habitação ao amenizar as sensações de desconforto, verificando-se que o vidro triplo com baixa emissividade resulta em condições de conforto mais satisfatórias. Tal como na situação anterior, também neste caso se aconselha complementar este estudo com uma análise económica, uma vez que este tipo de envidraçado acarreta custos relevantes.

4.8.2 Resultados do Cenário B

B.1 Simulação da solução construtiva da década de 1940

Balanço térmico

A Figura 4.13 diz respeito ao balanço térmico da solução construtiva da década de 1940.

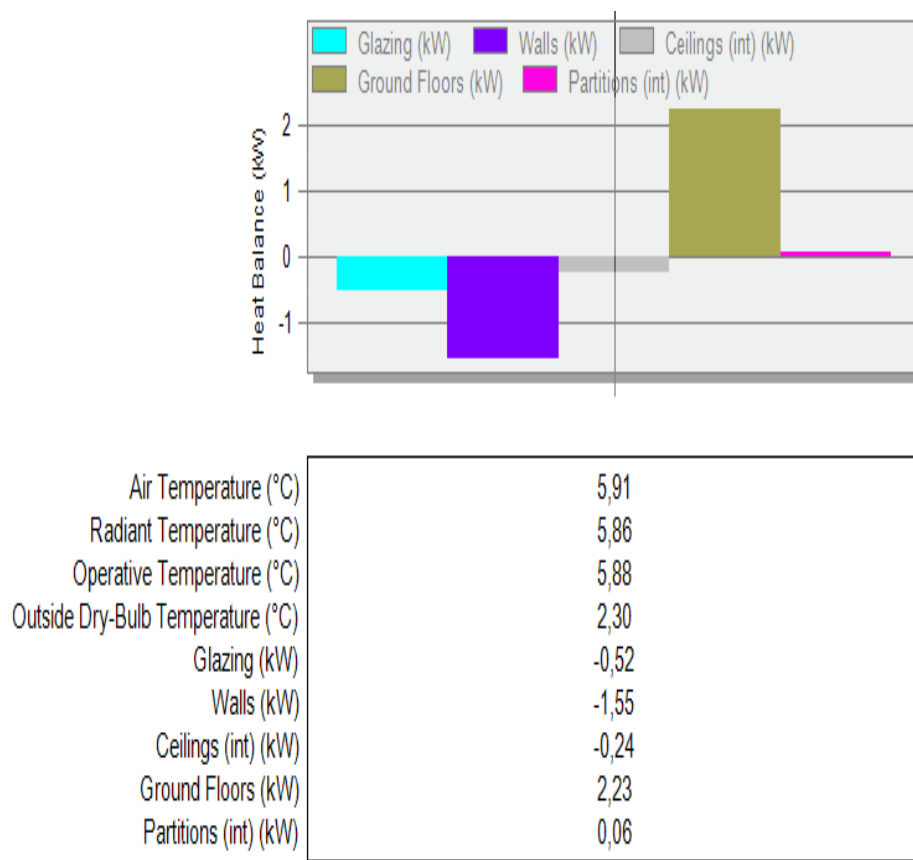


FIGURA 4.13 – BALANÇO TÉRMICO, DÉCADA DE 1940

Verifica-se que as perdas de calor através das paredes exteriores (-1,55 kW) e pelos envidraçados (-0,52 kW) são as mais significativas, seguidas pelas perdas através da cobertura (-0,24 kW). As paredes internas e o pavimento representam ganhos de calor de 0,06 kW e 2,23 kW, respetivamente. Pode observar-se que as perdas pelas paredes exteriores são maiores quando comparados com a solução de referência, o que pode ser explicado pela falta de isolamento, uma vez que esta solução construtiva oferece uma resistência térmica quase 5 vezes inferior à resistência oferecida pela solução construtiva de referência. Quanto às perdas pela cobertura, esta solução construtiva apresenta resultados semelhantes aos obtidos para a solução de referência, e também nesta situação os pavimentos são responsáveis por uma entrada de calor na habitação, o que pode ser explicado pelas mesmas razões enunciadas para o cenário anterior.

Ganhos internos

A Figura 4.14 revela os resultados obtidos quanto aos ganhos internos para a solução construtiva da década de 1940.

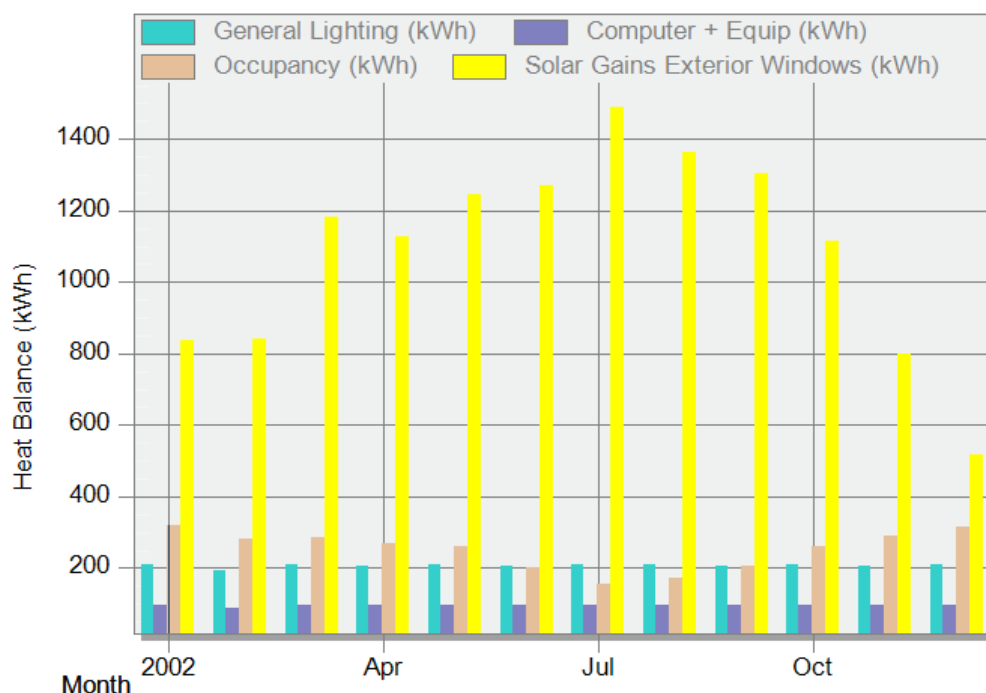


FIGURA 4.14 - GANHOS INTERNOS, DÉCADA DE 1940

Pode verificar-se que os ganhos internos resultantes dos ganhos solares através de envidraçados continuam a ser os mais relevantes, atingindo valores mais elevados durante os meses típicos de verão e valores mínimos nos meses de Dezembro e Janeiro. A observação destes resultados é expectável, uma vez que nos meses de verão a radiação solar é mais intensa e os períodos de exposição solar são mais extensos, contrariamente ao que, tipicamente, se observa nos meses de inverno. Tal como se observou anteriormente, os ganhos resultantes da ocupação vão diminuindo ligeiramente ao longo do ano atingindo valores mínimos no período de verão devido ao facto de se ter considerado um período de férias. Os ganhos devido a iluminação e a equipamentos vão-se mantendo praticamente constantes ao longo do ano.

Conforto térmico

Na Tabela 4.18 apresentam-se os índices de conforto obtidos para a solução construtiva representativa da década de 1940 para as zonas climáticas seleccionadas.

TABELA 4.18 - ÍNDICE PMV, DÉCADA DE 1940

Zona climática Inverno	Zona climática Verão	Município	Meses											
			Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
I ₁	V ₁	-												
	V ₂	Porto	-2,15	-1,87	-1,24	-2,45	-1,72	-0,56	0,14	0,02	-0,42	-0,41	-1,28	-1,99
	V ₃	Albufeira	-2,70	-2,36	-1,98	-2,27	-2,62	-0,27	0,58	0,58	0,01	-0,84	-1,77	-2,35
I ₂	V ₁	-												
	V ₂	Pombal	-2,22	-1,82	-1,39	-2,50	-1,84	-0,78	-0,28	-0,19	-0,61	-0,43	-1,36	-1,93
	V ₃	Abrantes	-2,09	-1,84	-1,32	-2,31	-1,59	-0,28	0,56	0,51	-0,07	-0,30	-1,28	-1,92
I ₃	V ₁	-												
	V ₂	Bragança	-2,99	-2,98	-2,09	-2,66	-2,95	-1,43	-0,13	-0,57	-1,49	-1,37	-2,42	-2,96
	V ₃	-												

Legenda:

Escala	-2 a -3	-1 a -2	0 a -1	0	0 a 1	1 a 2	2 a 3
Sensação	Muito Frio	Frio	Ligeiramente Frio	Confortável	Ligeiramente Quente	Quente	Muito Quente

Da análise dos resultados verifica-se que de Janeiro a Maio predominam as sensações de Frio ou Muito Frio e os níveis de maior desconforto dizem respeito a zonas climáticas situadas mais a Norte, onde as temperaturas exteriores são mais baixas no período de Inverno. Nos três meses típicos de Verão (Junho, Julho e Agosto) verifica-se a predominância da sensação de Ligeiramente Frio e Ligeiramente Quente e tendo em conta que do ponto de vista prático se consideram admissíveis níveis de conforto de $0 \pm 0,5$ (assinalados a vermelho), assiste-se a uma predominância da sensação de conforto. Nos restantes meses, e com a proximidade do inverno, volta a predominar a sensação de Frio e Muito Frio.

Em comparação com a solução de referência, verifica-se que de forma geral e independentemente da localização climática definida para a habitação, esta escolha construtiva resulta em índices de desconforto mais acentuados.

B.2 Simulação da solução construtiva da década de 1970

Balanço térmico

Quanto ao balanço térmico da solução construtiva da década de 1970, a Figura 4.15 revela os resultados obtidos.

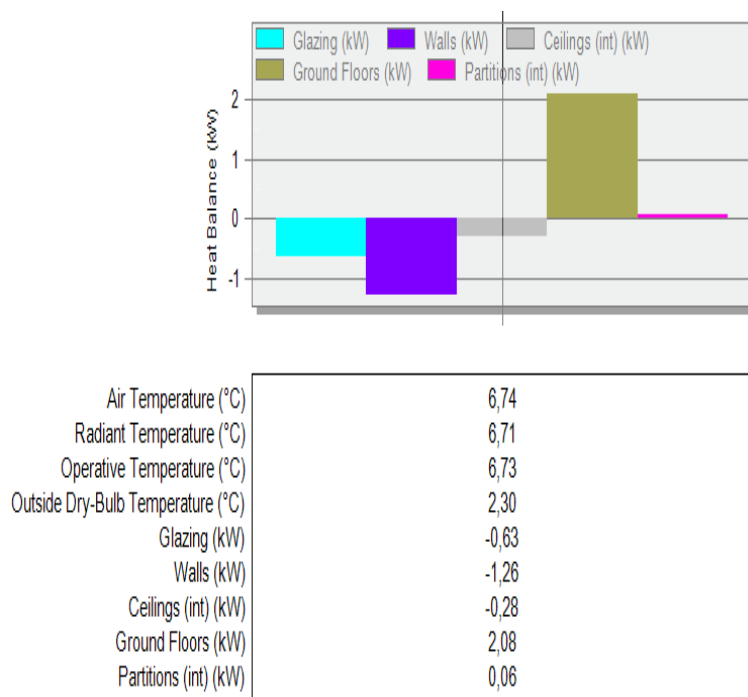


FIGURA 4.15 – BALANÇO TÉRMICO, DÉCADA DE 1970

Verifica-se que as perdas de calor através das paredes exteriores (-1,26 kW) e pelos envidraçados (-0,63 kW) são as mais significativas, seguidas pelas perdas através da cobertura (-0,28 kW). As paredes internas e o pavimento representam ganhos de 0,06 kW e 2,08 kW, respetivamente.

Em comparação com a solução construtiva da década de 1940, as perdas de calor pelas paredes exteriores diminuíram ligeiramente (devido em parte à existência da caixa-de-ar caracterizada por uma condutibilidade térmica baixa) mas apresentam valores muito diferentes dos obtidos para a solução de referência, o que mais uma vez pode ser explicado pela falta da utilização de material isolante. As perdas pelos envidraçados agravaram-se ligeiramente em comparação com a solução dos anos 40, devido à caixilharia em alumínio que não é um material com características isolantes. Quanto às perdas pela cobertura, a solução construtiva apresenta um valor baixo e também neste caso se verificam ganhos de calor pelo pavimento explicadas pelo facto de o *software* apresentar os resultados para o período de inverno, quando tanto a temperatura exterior como a temperatura interior da habitação são inferiores à temperatura do solo. Desta forma explica-se que o fluxo de calor entre o solo e o pavimento se dê do exterior para o interior da habitação.

Ganhos internos

Da mesma forma, a Figura 4.16 mostra os ganhos internos obtidos para a solução construtiva representativa da década de 1970.

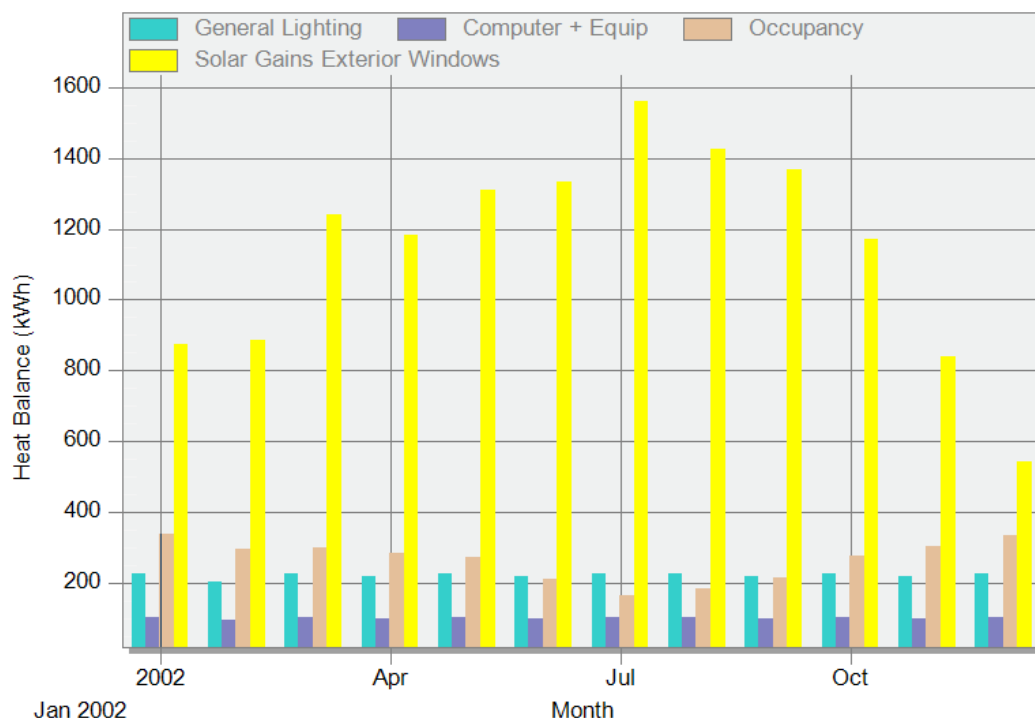


FIGURA 4.16- GANHOS INTERNOS, DÉCADA DE 1970

Mais uma vez se verifica que os ganhos solares através dos envidraçados são os mais significativos, podendo variar entre os quase 1565 kWh no mês de Julho e os cerca de 545 kWh em Dezembro. Tal como foi verificado anteriormente, estes ganhos são máximos nos meses de verão e atingem valores mínimos no inverno. Os ganhos resultantes da ocupação diminuem ligeiramente no período de verão devido à existência de um período de férias, durante o qual o edifício está desocupado e os ganhos devido a iluminação e a equipamentos vão-se mantendo praticamente constantes ao longo do ano. Verifica-se uma grande similaridade entre os resultados obtidos nesta situação e na situação anterior, explicada pelo facto de se terem mantido constantes as variáveis de entrada, diferindo apenas a tipologia construtiva.

Conforto térmico

Na Tabela 4.19 encontram-se os resultados obtidos para o índice PMV resultantes da solução construtiva representativa da década de 1970.

TABELA 4.19 - ÍNDICE PMV, DÉCADA DE 1970

Zona climática Inverno	Zona climática Verão	Município	Meses											
			Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
I ₁	V ₁	-												
	V ₂	Porto	-2,13	-1,84	-1,23	-2,43	-1,69	-0,54	0,15	0,03	-0,42	-0,41	-1,27	-1,98
	V ₃	Albufeira	-2,66	-2,34	-1,95	-2,24	-2,59	-0,24	0,60	0,59	0,01	-0,84	-1,76	-2,34
I ₂	V ₁	-												
	V ₂	Pombal	-2,20	-1,80	-1,37	-2,46	-1,82	-0,75	-0,26	-0,19	-0,61	-0,42	-1,35	-1,91
	V ₃	Abrantes	-2,08	-1,82	-1,30	-2,29	-1,56	-0,27	0,56	0,51	-0,07	-0,29	-1,27	-1,92
I ₃	V ₁	-												
	V ₂	Bragança	-2,36	-2,95	-2,07	-2,60	-2,90	-1,39	-0,12	-0,55	-1,47	-1,35	-2,40	-2,09
	V ₃	-												

Legenda:

Escala	-2 a -3	-1 a -2	0 a -1	0	0 a 1	1 a 2	2 a 3
Sensação	Muito Frio	Frio	Levemente Frio	Confortável	Levemente Quente	Quente	Muito Quente

Tal como nas situações anteriores verifica-se que nos primeiros cinco meses do ano predomina a sensação de Frio ou Muito Frio no interior do edifício. Com a aproximação dos meses de verão assiste-se a uma mudança nesta tendência e regista-se, em algumas zonas climáticas, a sensação de Ligeiramente Quente. Porém, é nestes meses que se registam sensações de conforto (ao considerar Confortável o intervalo $0 \pm 0,5$) nas zonas consideradas. Com a chegada dos meses de Outono e Inverno (entre os meses de Setembro e Dezembro), registam-se novamente sensações de Frio ou Muito Frio.

Salienta-se que no caso da zona climática I₃ V₂, a aplicação desta solução construtiva resultou em condições de grande desconforto num grande período do ano, concluindo-se que a implementação desta solução não é adequada para esta localização.

4.8.3 Resultados Cenário C

Balanço térmico

Na Figura 4.17 apresentam-se os resultados obtidos para as perdas pela envolvente com a colocação de isolamento pelo exterior na solução construtiva representativa da década de 1940.

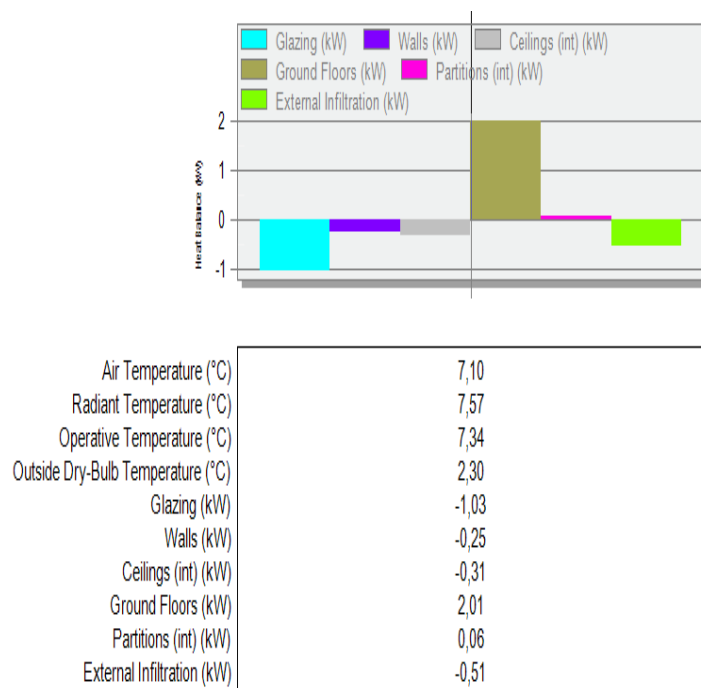


FIGURA 4.17 – BALANÇO TÉRMICO, ISOLAMENTO PELO EXTERIOR

Pode observar-se que com a colocação de isolamento na envolvente opaca vertical, as perdas pelas paredes são consideravelmente minimizadas quando comparadas com a solução não isolada (de -1,55 kW para -0,25 kW, respetivamente). A Figura 4.18 revela os resultados obtidos para a colocação da mesma espessura de isolamento pelo interior da parede.

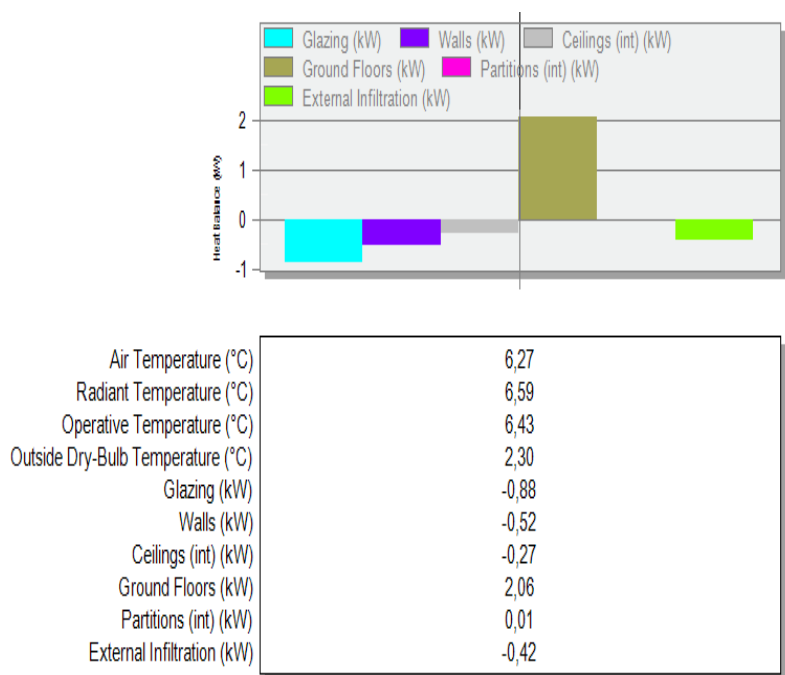


FIGURA 4.18 – BALANÇO TÉRMICO, ISOLAMENTO PELO INTERIOR

Observando as Figuras 4.16 e 4.17, constata-se que a colocação de isolamento pelo exterior apresenta um resultado mais favorável pois obtém-se uma camada contínua de isolamento, evitando-se as pontes térmicas e as flutuações bruscas de energia térmica entre a face interior e exterior do elemento construtivo. Uma vez que a única alteração efetuada foi ao nível das paredes exteriores, verifica-se ainda que as perdas pelos restantes elementos são similares às perdas registadas para a solução construtiva representativa da década de 1940 sem isolamento.

Ganhos internos

As Figuras 4.19 e 4.20 dizem respeito aos resultados obtidos para os ganhos internos da solução construtiva com colocação de isolamento pelo exterior e pelo interior, respetivamente.

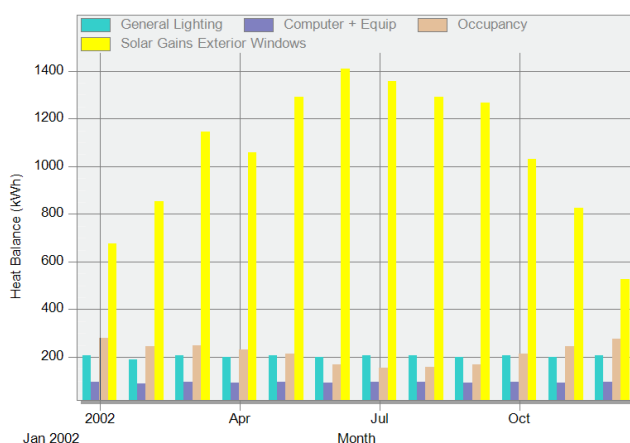


FIGURA 4.19 - GANHOS INTERNOS, COLOCAÇÃO DE ISOLAMENTO PELO EXTERIOR

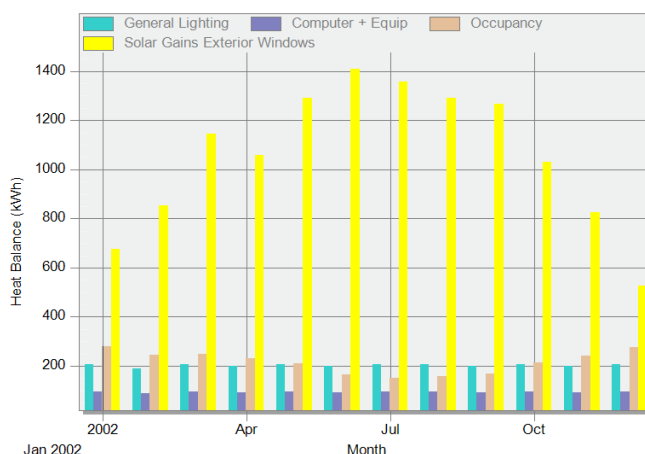


FIGURA 4.20 - GANHOS INTERNOS, COLOCAÇÃO DE ISOLAMENTO PELO INTERIOR

Tanto na Figura 4.19 como na Figura 4.20 se assiste a uma similaridade de valores quanto aos ganhos internos, uma vez que nenhum dos parâmetros que influencia diretamente estes valores

foi alterado, à exceção da solução construtiva. Pode verificar-se que os ganhos solares através dos envidraçados continuam a ser os mais relevantes, atingindo valores mais elevados durante o verão e mínimos no inverno. Tal como observado anteriormente, os ganhos resultantes da ocupação vão diminuindo ligeiramente ao longo do ano atingindo valores mínimos no período de verão e os ganhos devido a iluminação e a equipamentos vão-se mantendo praticamente constantes ao longo do ano.

Conforto Térmico

As Tabelas 4.20 e 4.21 apresentam os resultados de conforto térmico para a opção da colocação de isolamento pelo exterior e pelo interior, respetivamente.

TABELA 4.20 - ÍNDICE PMV, ISOLAMENTO PELO EXTERIOR

Zona climática Inverno	Zona climática Verão	Município	Meses											
			Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
I ₁	V ₁	-												
	V ₂	Porto	-1,92	-1,67	-1,09	-2,27	-1,60	-0,55	0,05	-0,04	-0,38	-0,27	-1,20	-1,73
	V ₃	Albufeira	-2,39	-2,07	-1,74	-2,44	-2,36	-0,40	0,46	0,50	-0,01	-0,60	-1,51	-2,02
I ₂	V ₁	-												
	V ₂	Pombal	-1,95	-1,60	-1,22	-2,30	-1,66	-0,78	-0,28	-0,20	-0,56	-0,29	-1,14	-1,71
	V ₃	Abrantes	-1,86	-1,65	-1,16	-2,14	-1,51	-0,32	0,44	0,39	-0,09	-0,19	-1,05	-1,69
I ₃	V ₁	-												
	V ₂	Bragança	-2,94	-2,65	-1,82	-2,31	-2,33	-1,35	-0,10	-0,47	-1,35	-1,11	-2,08	-2,73
	V ₃	-												

TABELA 4.21 - ÍNDICE PMV, ISOLAMENTO PELO INTERIOR

Zona climática Inverno	Zona climática Verão	Município	Meses											
			Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
I ₁	V ₁	-												
	V ₂	Porto	-1,92	-1,63	-1,05	-2,23	-1,55	-0,50	0,09	-0,02	-0,39	-0,31	-1,11	-1,77
	V ₃	Albufeira	-2,37	-2,05	-1,70	-2,92	-2,33	-0,26	0,50	0,50	-0,01	-0,68	-1,53	-2,05
I ₂	V ₁	-												
	V ₂	Pombal	-1,95	-1,58	-1,18	-2,24	-1,64	-0,70	-0,25	-0,20	-0,57	-0,32	-1,15	-1,71
	V ₃	Abrantes	-1,85	-1,61	-1,13	-2,09	-1,44	-0,25	0,46	0,40	-0,10	-0,20	-1,09	-1,71
I ₃	V ₁	-												
	V ₂	Bragança	-2,97	-2,61	-1,79	-2,36	-2,59	-1,26	-0,09	-0,49	-1,32	-1,14	-2,12	-2,76
	V ₃	-												

Legenda:

Escala	-2 a -3	-1 a -2	0 a -1	0	0 a 1	1 a 2	2 a 3
Sensação	Muito Frio	Frio	Ligeiramente Frio	Confortável	Ligeiramente Quente	Quente	Muito Quente

Da análise dos resultados verifica-se, tal como nos cenários anteriores, a predominância da sensação de Frio e Muito Frio nos cinco primeiros meses do ano. De Junho a Setembro, em ambas as situações e considerando aceitáveis níveis de conforto de $0 \pm 0,5$, registam-se situações de conforto térmico, que se prolongam ao mês de Outubro em algumas das zonas climáticas. Nos últimos dois meses do ano voltam a verificar-se sensações de Frio e Muito Frio.

Em comparação com a solução construtiva da década de 1940 (não isolada), verifica-se uma melhoria considerável ao nível da sensação de conforto térmico, uma vez que se verifica o aumento do número de meses em que, nas diferentes zonas climáticas, se regista esta condição. Ao aliar o facto de se registar um aumento na sensação de conforto térmico e a diminuição considerável das perdas pela envolvente vertical, pode concluir-se que a colocação de isolamento pelo exterior é mais eficaz na melhoria do desempenho térmico da habitação.

Capítulo V – Conclusões finais e perspectivas para trabalhos futuros

5.1. Conclusões finais

O objetivo proposto para este trabalho foi atingido ao demonstrar-se a relação entre a colocação de isolamento térmico na envolvente dos edifícios e o aumento do conforto térmico dos seus ocupantes. A principal conclusão retirada deste trabalho consiste na verificação de níveis de conforto satisfatórios na solução construtiva com isolamento nas paredes exteriores, pavimento e cobertura. Por outro lado, as soluções construtivas representativas de décadas anteriores apresentaram níveis de desconforto acentuados, principalmente nas zonas climáticas situadas mais a Norte do país (caracterizadas por situações climáticas mais rigorosas), atestando a importância da localização geográfica e climática no processo de simulação.

Do desenvolvimento do presente trabalho resultaram ainda outras conclusões, nomeadamente ao nível da importância da inércia térmica no desempenho do edifício. Concluiu-se que a habitação unifamiliar estudada tem uma inércia térmica forte, e por isso, a colocação de espessuras superiores de isolamento não contribui significativamente para a melhoria dos índices de conforto no interior do edifício. Foi ainda avaliada a importância da escolha de envidraçados, concluindo-se que a opção por vidros triplos com película de baixa emissividade contribui, por si só, para o aumento do conforto na habitação. Finalmente, foi avaliada a importância do local de colocação do isolamento na solução construtiva, verificando-se que a colocação de isolamento pelo exterior potencia o efeito da inércia térmica e promove melhores níveis de conforto térmico, comparativamente com a colocação do mesmo tipo e espessura de isolamento pelo interior.

5.2. Perspetivas para trabalhos futuros

De modo a complementar os resultados obtidos, seria interessante a realização de estudos económicos relativos aos custos associados à colocação de uma maior espessura de isolamento na solução construtiva analisada e à substituição dos envidraçados da solução de referência por vidros triplos de baixa emissividade. Poderia também ser efetuado um estudo mais minucioso ao nível do conforto térmico numa base horária, com a finalidade de verificar as variações das sensações de conforto ao longo dos dias para o período de um ano.

Por outro lado, seria também interessante estudar a relação custo-benefício da incorporação de outros isolantes térmicos menos comuns em Portugal, como a cortiça, cuja maior comercialização poderia resultar numa expansão de outros setores económicos no país.

Bibliografia

- [1] R. Barbosa, R. Vicente e R. Santos, "Climate Change and thermal comfort in Southern Europe housing: a case study from Lisbon," *Building and Environment*, pp. 440-451, 2015.
- [2] P. Isolani, *Eficiência energética nos edifícios residenciais*, Lisboa: Intelligent Energy Europe, 2008.
- [3] DGEG, *Energia em Portugal*, Lisboa, 2016.
- [4] ADENE, "Guia da eficiência energética," Lisboa, 2012.
- [5] INE/ LNEC, "O parque habitacional e a sua reabilitação - análise e evolução," INE, Lisboa, 2013.
- [6] P. O. Fanger, "Human requirements in future air-conditioned environments," *International Journal of Refrigeration*, pp. 148-153, 2001.
- [7] A. Ngowi, "A hybrid approach to house construction - a case study in Botswana," *Building Research & Information*, p. 25(3), 1997.
- [8] Instituto da Habitação e Reabilitação Urbana, Universidade Católica Portuguesa, "Atlas da Habitação de Portugal," Lisboa, 2007.
- [9] J.-H. J., J.-B. J. J.-D. Beatriz Rodríguez-Soria, "Review of international regulations governing the thermal insulation requirements of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 78-90, 2014.
- [10] ADENE, "Legislação," [Online]. Available: <http://www.adene.pt/legislacao>. [Acedido em 03 Março 2016].
- [11] C. EPBD, *Implementing the Energy Performance of Buildings Directive*, Porto, 2013.
- [12] D. M. S. Al-Homoud, "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Building and Environment*, p. 353-366, 2005.
- [13] J. M. M. F. J. M. Castilla, "Técnicas de Control del Confort en Edificios," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, pp. 4-24, Julho 2010.
- [14] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 55-2010*, Atlanta, 2010.
- [15] *Decreto-Lei n.º 80/2006*, 2006.
- [16] V. Bradshaw, "Human Comfort and Health Requirements," em *The Building Environment: Active and Passive Control Systems*, 2006, pp. 4-37.
- [17] A. B. Frota e S. R. Schiffer, *Manual de Conforto Térmico*, São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- [18] P. C. P. d. Silva, "Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE," Universidade do Minho, 2006.

- [19] ASHRAE, "Thermal Comfort," em *ASHRAE Fundamentals Handbook*, 1997, p. Chapter 8.
- [20] P. Gut e D. Ackerknecht, *Climate responsive buildings: appropriate building construction in tropical and subtropical regions*, Switzerland : SKAT Foundation , 1993.
- [21] O. Fanger, *Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Nova Iorque: McGraw-Hill Book Company, 1970.
- [22] M. Águas, "Conforto térmico," Instituto Superior técnico.
- [23] J. Nicol e M. Humphreys, "Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings.," *Energy and Buildings*, pp. 563-572, 2002.
- [24] R. Mateus, "Tecnologias construtivas," Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, [Online]. Available: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/817/6/Parte%20II.pdf>. [Acedido em 11 Março 2016].
- [25] LNEC, "Evolução das tipologias construtivas em Portugal," 22 4 2005. [Online]. Available: http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/evol_tipol.html. [Acedido em 28 Outubro 2015].
- [26] P. Mendonça, "Capítulo III - Enquadramento histórico," [Online]. Available: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/4250/7/TeseDoutMendonca7.pdf+&cd=1&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=us>. [Acedido em 10 03 2016].
- [27] LNEC, "Edifícios com estrutura de alvenaria tipo gaioleiro (1880 a 1930)," 22 4 2005. [Online]. Available: http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/Edif_1880_1930.html. [Acedido em 12 Maio 2016].
- [28] LNEC, "Edifícios com estrutura mista de alvenaria e betão (1930 a 1940)," 22 4 2005. [Online]. Available: http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/Edif_1930_1940.html. [Acedido em 12 5 2016].
- [29] LNEC, "Edifícios com estrutura mista de betão e alvenaria (1940 a 1960)," 22 4 2005. [Online]. Available: http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/Edif_1940_1960.html. [Acedido em 12 Maio 2016].
- [30] LNEC, "Edifícios recentes de betão armado (> 1960)," 22 5 2005. [Online]. Available: http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/Edif_post_1960.html. [Acedido em 12 Maio 2016].
- [31] V. P. d. Freitas, *Isolamento térmico de fachadas pelo exterior*, Porto: maxit Group.
- [32] Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, "Revestimento de Pavimentos," [Online]. Available: http://www.civil.uminho.pt/lftc/Textos_files/construcoes/cp2/Cap.%20XVIII%20-%20Revestimentos%20de%20Pa. [Acedido em 05 13 2016].
- [33] P. V. P. e. P. Brito, "Classificação e descrição geral das soluções de revestimentos e coberturas inclinadas em edifícios," [Online]. Available: <http://www.civil.ist.utl.pt/~joaof/tc-cor/19%20Revestimentos%20de%20coberturas%20inclinadas%20-%2019%C2%AA%20e%2020%C2%AA%20aulas%20te%C3%B3ricas%20-%20COR.pdf>. [Acedido em 13 Maio 2016].
- [34] INE/ DGEG, "Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico," INE; dgeg, Lisboa, 2010.
- [35] J. F. d. C. Sirgado, "Análise do impacto dos vãos envidraçados no desempenho térmico dos edifícios," Instituto

Superior Técnico, Lisboa, 2010.

- [36] C. Sustentável, “Proporção Adequada das Áreas Envidraçadas,” [Online]. Available: <http://www.construcaosustentavel.pt/index.php?/O-Livro-%7C%7C-Construcao-Sustentavel/Eficiencia-Energetica/Proporcao-Adequada-das-Areas-Envidracadas>. [Acedido em 6 Agosto 2016].
- [37] H. G. e. J. M. Graça, *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*, Lisboa: INETI, 2004.
- [38] C. P. d. S. Á. R. Susana Camelo, “Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios - Manual de apoio à aplicação do RCCTE,” INETI, Lisboa, 2006.
- [39] *Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013*.
- [40] U. S. Department of Energy, “Energy.gov,” [Online]. Available: <http://energy.gov/energysaver/insulation>. [Acedido em 25 Agosto 2016].
- [41] V. A. Costa, “Transporte e Armazenamento de Energia,” Universidade de Aveiro, 2012/2013.
- [42] A. M. Rodrigues, A. C. d. Piedade e A. M. Braga, *Térmica de Edifícios*, Lisboa: Orion, 2009.
- [43] L. Aelenei, “Envolvente na Eficiência Energética do Edifício,” 21 Dezembro 2011. [Online]. Available: <http://pt.slideshare.net/Green-Campus/envolvente-de-edificios>. [Acedido em 6 Junho 2016].
- [44] AIPEX, “Eficiência energética na edificação,” [Online]. Available: http://www.aipex.es/eficiencia_po.php?idioma=po&s=2. [Acedido em 22 Junho 2016].
- [45] AREAM, *Desempenho Energético dos Edifícios*, Funchal.
- [46] C. A. P. d. S. e. L. Matias, *Coeficiente de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2014.
- [47] C. Sustentável, “Inércia Térmica,” [Online]. Available: <http://www.construcaosustentavel.pt/index.php?/O-Livro-%7C%7C-Construcao-Sustentavel/Eficiencia-Energetica/Inercia-Termica>. [Acedido em 19 Julho 2016].
- [48] A. Ben-Nakhi, “Development of an integrated dynamic thermal bridging assessment environment,” *Energy and Buildings*, pp. 375-382, 2003.
- [49] N. S. Michel Frénot, *O isolamento térmico*, Aix-en-Provence: Edições CETOP, 1979.
- [50] ASHRAE, “Handbook of Fundamentals,” American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 1997.
- [51] M. Paya, *Isolamento Térmico e acústico*, Lisboa: Plátano Edições Técnicas, 1999.
- [52] B. S. Ashok Kumar, “Experimental evaluation of insulation materials for walls and roofs and their impact on indoor thermal comfort under composite climate,” *Building and Environment*, pp. 635-643, 2013.
- [53] White Openline, “A importância do isolamento,” [Online]. Available: <http://whiteopenline.com/dicas-a-importancia-do-isolamento>. [Acedido em 22 Junho 2016].

- [54] A. Papadopoulos, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments," *Energy and Buildings*, p. 77–86, 2005.
- [55] B. P. Jelle, "Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities," *Energy and Buildings*, pp. 2549–2563, 2011.
- [56] AIPEX, "Materiais de isolamento," [Online]. Available: http://www.aipex.es/envolvente_po.php?s=2. [Acedido em 22 Junho 2016].
- [57] S. P. Rosanne Walker, "Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings," *Building and Environment*, pp. 155–165, 2015.
- [58] M. d. R. Veiga e A. Vilhena, Soluções de isolamento térmico - contributo para a resolução de anomalias de humidade, Lisboa: Energia - Guia de Eficiência Energética nos Edifícios, 2006.
- [59] N. Works, "DesignBuilder," [Online]. Available: <http://www.natural-works.com/db/>. [Acedido em 16 Agosto 2016].
- [60] L. Roriz, Climatização - Conceção, instalação e condução de sistemas, Alfragide: Edições Orion, 2007.
- [61] R. Aguiar, "Climatologia e Anos Meteorológicos de Referência para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios (versão 2013)," *Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P.*, 2013.
- [62] EN ISO 10077-1. 2012, *Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance*, 2012.
- [63] Despacho nº 15793 - K / 2013, 2013.
- [64] D. Software. [Online]. Available: <http://www.designbuilder.co.uk/helpv4.7>. [Acedido em 10 Agosto 2016].
- [65] E. E. Agengy, "Final energy consumption by sector and fuel," [Online]. Available: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment>. [Acedido em 12 Maio 2016].
- [66] R. Dear e G.S.Brager, "Thermal comfort in naturally ventilated buildings:revisions to ASHRAE Standard 55," *Energy and Buildings*, pp. 549–563, 2002.
- [67] *Portaria nº 349-D/2013*, 2013.
- [68] *Decreto-Lei nº 40/90*, 1990.

Anexos

Anexo I – Taxas metabólicas típicas em função da atividade [19]

Typical Metabolic Heat Generation for Various Activities

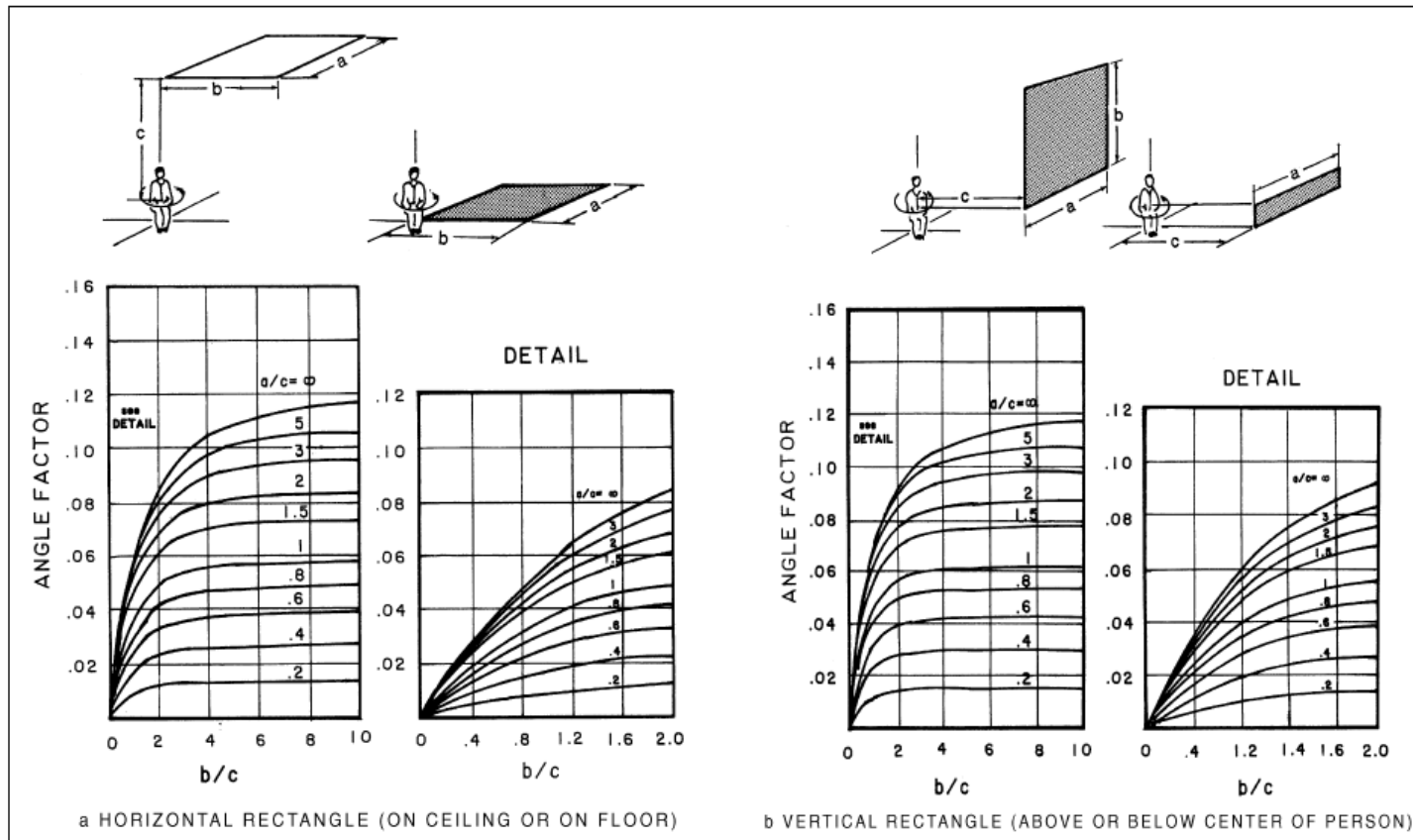
	W/m ²	met ^a
Resting		
Sleeping	40	0.7
Reclining	45	0.8
Seated, quiet	60	1.0
Standing, relaxed	70	1.2
Walking (on level surface)		
3.2 km/h (0.9 m/s)	115	2.0
4.3 km/h (1.2 m/s)	150	2.6
6.4 km/h (1.8 m/s)	220	3.8
Office Activities		
Reading, seated	55	1.0
Writing	60	1.0
Typing	65	1.1
Filing, seated	70	1.2
Filing, standing	80	1.4
Walking about	100	1.7
Lifting/packing	120	2.1
Driving/Flying		
Car	60-115	1.0-2.0
Aircraft, routine	70	1.2
Aircraft, instrument landing	105	1.8
Aircraft, combat	140	2.4
Heavy vehicle	185	3.2
Miscellaneous Occupational Activities		
Cooking	95-115	1.6-2.0
Housecleaning	115-200	2.0-3.4
Seated, heavy limb movement	130	2.2
Machine work		
sawing (table saw)	105	1.8
light (electrical industry)	115-140	2.0-2.4
heavy	235	4.0
Handling 50-kg bags	235	4.0
Pick and shovel work	235-280	4.0-4.8
Miscellaneous Leisure Activities		
Dancing, social	140-255	2.4-4.4
Calisthenics/exercise	175-235	3.0-4.0
Tennis, singles	210-270	3.6-4.0
Basketball	290-440	5.0-7.6
Wrestling, competitive	410-505	7.0-8.7

Anexo II – Efeito isolante do vestuário [16]

TABLE 1.3 CLO VALUES FOR INDIVIDUAL ITEMS OF CLOTHING

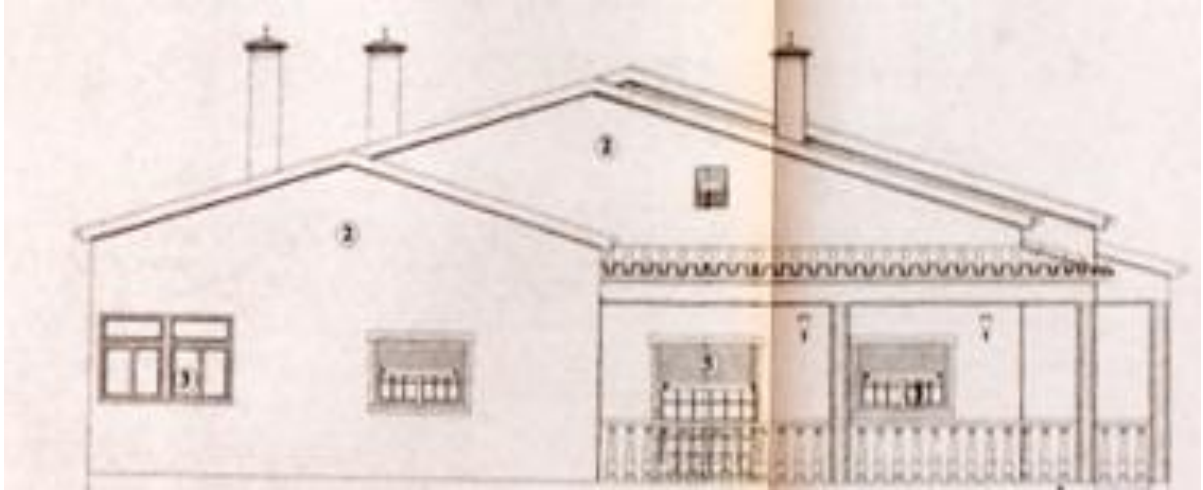
Men		Women	
Clothing	clo	Clothing	clo
Underwear		Underwear	
Sleeveless	0.06	Girdle	0.04
T-shirt	0.09	Bra and panties	0.05
Briefs	0.05	Half slip	0.13
Long underwear, upper	0.10	Full slip	0.19
Long underwear, lower	0.10	Long underwear, upper	0.10
		Long underwear, lower	0.10
Shirt		Blouse	
Light, short sleeve	0.14	Light, long sleeve	0.20
long sleeve	0.22	Heavy, long sleeve	0.29
Heavy, short sleeve	0.25	Dress, light	0.22
long sleeve	0.29	Dress, heavy	0.70
(Plus 5% for tie or turtleneck)			
Vest, light	0.15	Skirt, light	0.10
Vest, heavy	0.29	Skirt, heavy	0.22
Trousers, light	0.26	Slacks, light	0.10
Trousers, heavy	0.32	Slacks, heavy	0.44
		Sweater	
Sweater, light	0.20	Light, sleeveless	0.17
Sweater, heavy	0.37	Heavy, long sleeve	0.37
Jacket, light	0.22	Jacket, light	0.17
Jacket, heavy	0.49	Jacket, heavy	0.37
Socks		Stockings	
Ankle length, thin	0.03	Any length	0.01
thick	0.04	Panty hose	0.01
Knee high	0.10		
Shoes		Shoes	
Sandals	0.02	Sandals	0.02
Oxfords	0.04	Pumps	0.04
Boots	0.08	Boots	0.08
Hat and overcoat	2.00	Hat and overcoat	2.00

Anexo III – Fatores de forma entre o individuo e a superfície N [19]

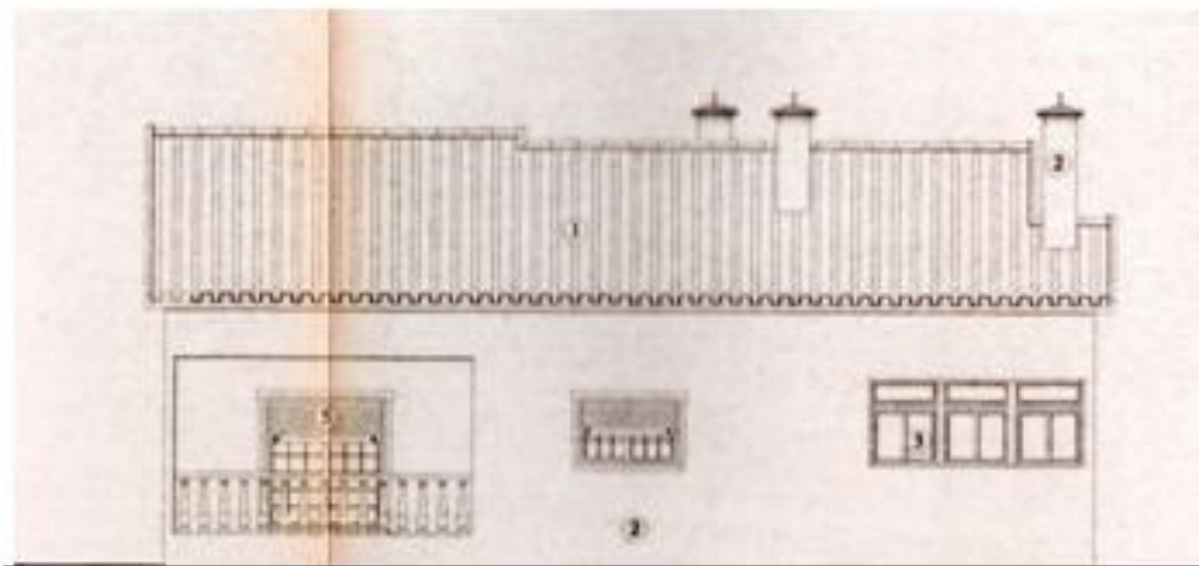


Anexo IV – Alçados da habitação utilizada nas simulações

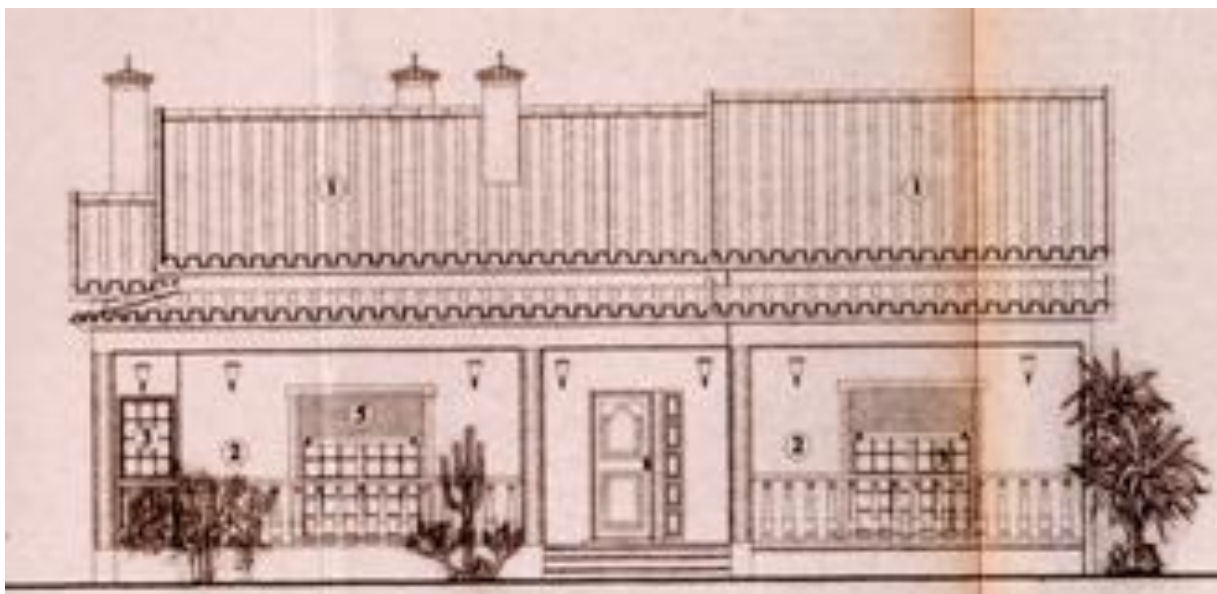
Alçado esquerdo



Alçado posterior



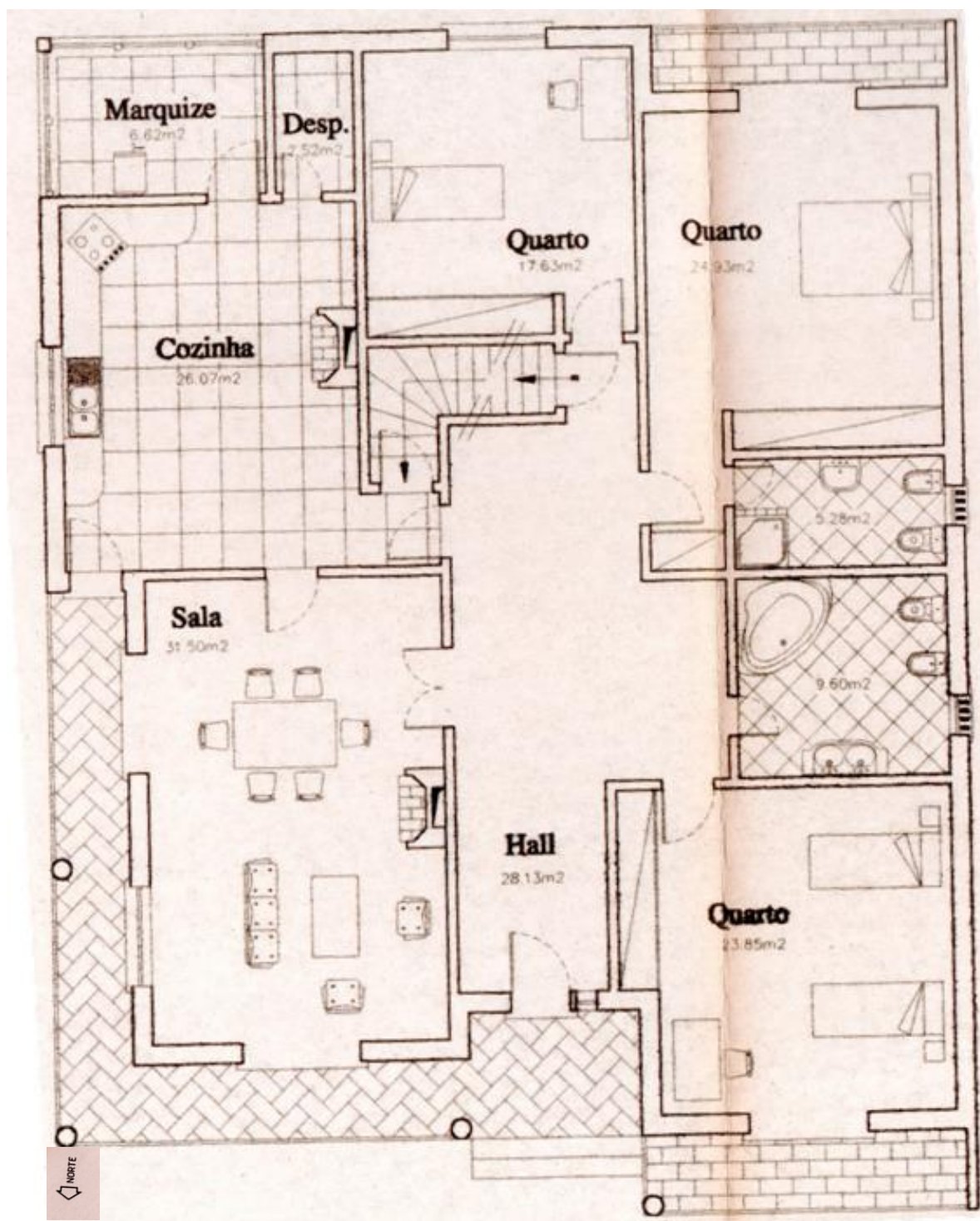
Alçado principal



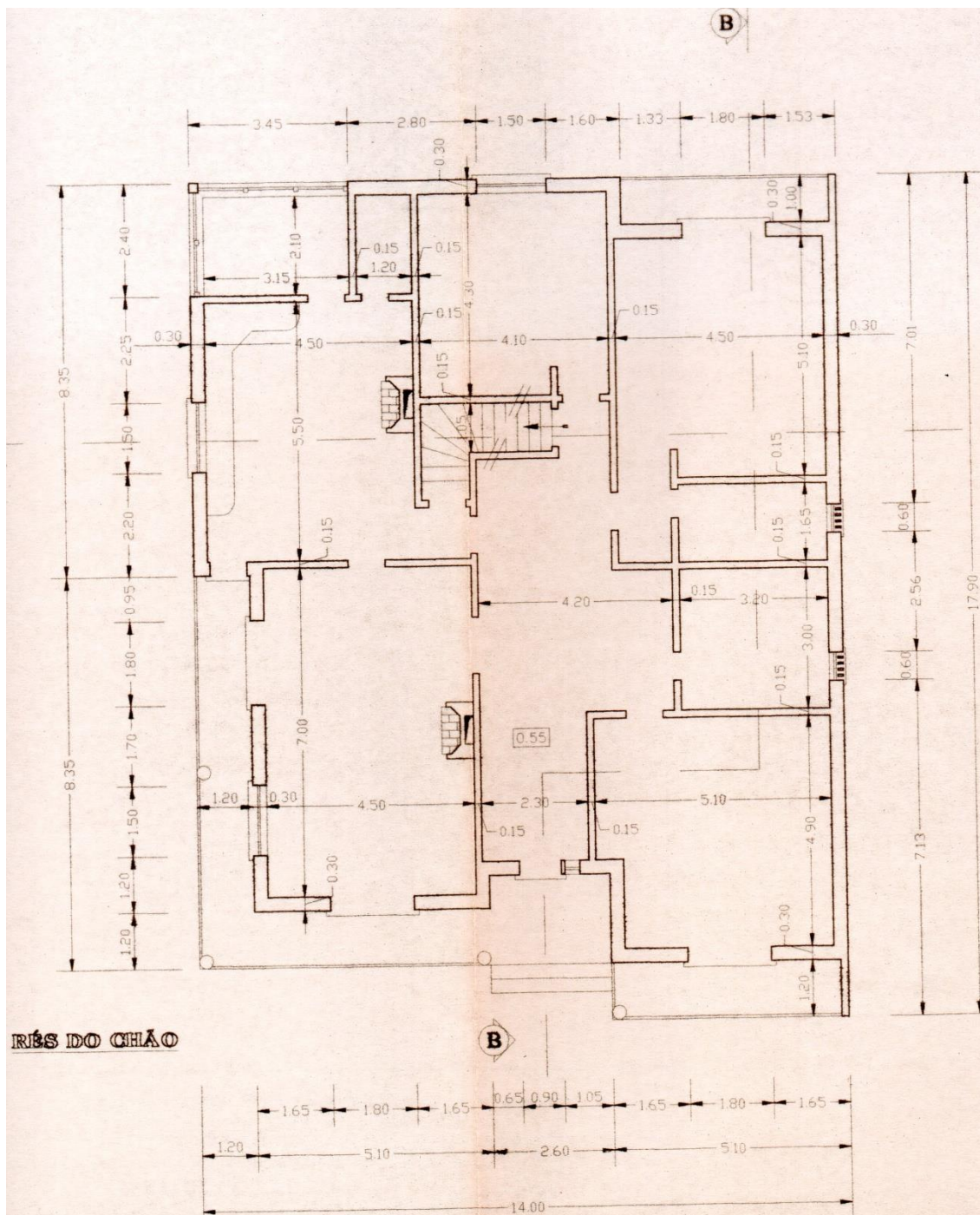
MATERIAIS

- ① Telha cerâmica "Lusa"
- ② Tinta plástica branca
- ③ Calxilharia de alumínio lacado
- ④ Cantaria pedra da região
- ⑤ Persianas de alumínio lacado

Anexo V — Compartimentação da habitação original



Anexo VI – Dimensões



Anexo VII – Descrição da solução construtiva

3. TRABALHOS A REALIZAR

3.1 Fundações

As fundações serão em betão ciclópico e irão até à profundidade necessária para encontrar o firme do terreno. Terão as dimensões indicadas no projecto de betão armado e serão circundadas por um dreno.

3.2 Paredes

As paredes exteriores a executar serão compostas por dois panos de tijolo furado 30x20x11, havendo entre os dois panos placas de poliuretano com espessura de acordo com o estudo térmico a apresentar em separado.

As interiores serão compostas por um pano de tijolo furado 30x20x11, ficando após o reboco nas duas faces com 15cm de espessura.

Todos os elementos cerâmicos ou de betão que constituem as paredes serão assentes ao alto com argamassa de cimento e areia ao traço de 1:6.

3.3 Pavimentos

O pavimento interior da cave será composto por um enrocamento de pedra com 15cm sobre o qual será aplicada uma betonilha de argamassa de cimento e areia ao traço 1:5. Será afagada e queimada à colher

Será aplicado mosaico cerâmico nos WC's, hall, corredor, cozinha e varandas; e parquet de madeira exótica nos quartos e sala.

3.4 Tectos

Os tectos serão chapiscados e esboçados para depois serem pintados na totalidade a tinta plástica, sendo aplicada tinta anti-fungos nas zonas húmidas (casas de banho, cozinhas, marquizes, etc...).

3.5 Cobertura

A cobertura da moradia será composta por telhas cerâmicas de barro vermelho, assentes com todos os acessórios sobre ripado pré-esforçado.

3.6 Revestimento de paredes

As paredes interiores serão esboçadas ao traço 1:1:5 (cal, cimento e areia), sendo pintadas a tinta de água de cor suave, exceptuando-se as das instalações sanitárias e cozinha que serão revestidas a azulejo.

As paredes exteriores serão chapiscadas e rebocadas ao traço de 1:4 podendo ser adicionado um aditivo hidrófugo à massa de reboco. Serão pintadas a tinta plástica de cor branca.

3.7. Caixilharias

As janelas e portas exteriores serão de alumínio anodizado, assentes com vidro duplo. As janelas serão resguardadas por persianas de plástico de cor clara.

3.8 Carpintarias

Os aros das portas interiores serão de madeira exótica maciça, sendo as portas do tipo "Placarol", assentes com todas as ferragens. Todo o conjunto será envernizado no final.

3.9 Cantarias

As soleiras e peitoris, assim como os cobertores e espelhos das escadas, serão de vidro polido.

3.10 Equipamento

Todas as louças a montar nas instalações sanitárias serão do tipo "Valadares" ou similar, da classe NOR, assentes com todos os acessórios e devidamente sifonados e ligados às redes de águas e esgotos.

3.11 Rede de águas

O abastecimento de água é feito a partir da rede geral que abastece a zona, servindo as respectivas dependências através de tubos de cobre, com calibre adequado, de acordo com o projecto da especialidade.

3.12 Rede de esgotos

Todo o sistema será em tubo de PVC, convergindo para uma fossa séptica e poço absorvente, executados de acordo com o projecto respectivo.

3.13 Instalação eléctrica

Toda a instalação eléctrica será executada por técnico da especialidade dentro das normas regulamentares e de acordo com as indicações das concessionárias.

4. OMISSOS

Em tudo quanto for omissos na presente memória descritiva e justificativa seguir-se-á a legislação em vigor e as normas da construção civil.